

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE
FLUIDOS**

PROYECTO FIN DE CARRERA

***ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO Y DE AGUA CALIENTE
SANITARIA DE UNA FINCA RÚSTICA MEDIANTE ENERGÍA
SOLAR.***

TUTOR: Néstor García Hernando

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

AUTOR: José Blas Rico Gómez

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

Índice

OBJETIVO del proyecto.....	6
CAPÍTULO I: Introducción	8
1. Características del emplazamiento.....	9
2. Introducción a la instalación.....	12
3. Características climáticas del emplazamiento.....	14
4. Pérdidas debidas al emplazamiento.....	16
CAPÍTULO II: Instalación de ACS	22
5. Descripción de la instalación y sus componentes.....	23
6. Demanda de ACS.....	29
7. Demanda energética para ACS.....	33
8. Dimensionado de los componentes.....	35
8.1 Dimensionado preliminar del campo de captadores.....	35
8.1.1 Planteamiento del problema.....	41
8.1.2 Resolución.....	45
8.2 Pérdidas de calor en los captadores.....	46
8.2.1 Método de las resistencias térmicas.....	46
8.2.2 Cálculo de las pérdidas.....	56
8.3 Otras pérdidas de calor en la instalación.....	60
8.3.1 Pérdidas de calor en conducciones.....	60
8.3.2 Pérdidas en el tanque de almacenamiento.....	64
8.4 Cálculo de la superficie de captadores real.....	66
8.5 Disposición del campo de captadores.....	68

8.6 Dimensionado del intercambiador de calor.....	72
8.7 Dimensionado de las bombas de impulsión.....	76
8.7.1 Pérdidas de presión en tuberías.....	76
8.7.1 Pérdidas de presión en captadores.....	79
8.7.3 Pérdidas de presión en el intercambiador.....	79
8.8 Dimensionado del tanque acumulador.....	81
8.9 Dimensionado del disipador.....	82
8.10 Dimensionado del vaso de expansión.....	84
8.11 Dimensionado del sistema de apoyo.....	86
 <i>CAPÍTULO III: Instalación de bombeo.....</i>	 88
9. Características de la instalación.....	89
10. Demanda total de agua.....	91
11. Dimensionado de la instalación.....	92
11.1 Depósito.....	92
11.2 Conducciones.....	93
11.3 Bomba de impulsión.....	94
 <i>CAPÍTULO IV: Instalación Solar Fotovoltaica.....</i>	 100
12. Principio de funcionamiento.....	101
13. Descripción de la instalación.....	103
14. Demanda energética.....	111
15. Evaluación del recurso solar.....	116
16. Dimensionado de la instalación.....	117
16.1 Potencia del campo generador.....	117

16.2 Acumulador eléctrico.....	121
16.3 Regulador.....	124
16.4 Inversor.....	125
16.5 Cableado.....	126
16.6 Sistema de apoyo.....	129
<i>CAPÍTULO V: Estudio económico.....</i>	130
17. Estudio económico de la instalación solar.....	132
18. Estudio económico de la utilización de combustibles fósiles.....	135
19. Estudio económico de la conexión a la red eléctrica.....	137
20. Comparativa.....	139
<i>CAPÍTULO VI: Estudio medioambiental.....</i>	142
<i>CONCLUSIONES.....</i>	147
<i>TRABAJOS FUTUROS.....</i>	148
<i>ANEXOS.....</i>	149
I. Bibliografía.	
II. Programas MathCAD.	
III. Planos.	
IV. Tablas de Resultados.	

Nomenclatura utilizada

I_t : Radiación total recibida en el plano inclinado [W/m^2].

$I_{horizontal}$: Radiación total recibida en el plano horizontal [W/m^2].

K_β : Factor de corrección de la radiación en el plano inclinado [-].

η_T : Rendimiento total del captador.

a_{00} y η_0 : Rendimiento óptico del captador.

a_{11} : Coeficiente de pérdidas del captador [W/K].

D_{X° : Volumen de agua demandado a la temperatura de X° [l].

ρ_X : Densidad del fluido X [kg/m^3].

m_1 y m_2 : Caudal másico que circula por los circuitos primario y secundario, respectivamente [kg/s].

m_{cons} : Caudal másico de consumo.

c_{p1} y c_{p2} : Calor específico del fluido del circuito primario y secundario, respectivamente [$KJ/kg.K$].

c_{pmin} : Valor mínimo entre el calor específico del fluido del circuito primario y el del secundario.

c_{pcons} : Calor específico del fluido de consumo, agua.

T_{sum} : Temperatura a la que se desea suministrar el ACS. [$^\circ C$ ó K].

T_{red} : Temperatura del agua fría [$^\circ C$ ó K].

T_{cons} es la temperatura de salida del tanque hacia el consumo.

T_{red} es la temperatura del agua fría extraída del pozo.

T_{co} : Temperatura de salida del colector del fluido caloportador [$^\circ C$ ó K].

T_{ci} : Temperatura de entrada en el colector del fluido caloportador [$^\circ C$ ó K].

T_{ico} : Temperatura de salida del intercambiador del fluido de consumo [$^\circ C$ ó K].

T_{ici} : Temperatura de entrada en el intercambiador del fluido de consumo [$^\circ C$ ó K].

A_c : Superficie del campo de colectores [m^2].

ε : Eficiencia del intercambiador de calor [-].

E : Grado de estratificación del tanque [-].

f : Fracción solar [-].

V_X : velocidad del fluido X [m/s].

μ_{fluido} : Viscosidad dinámica del fluido [Ns/m^2].

μ_X : viscosidad dinámica del fluido X [Ns/m²].

L_c : longitud característica [m].

h : Coeficiente de convección [W/m²K].

k : Conductividad térmica [W/mK].

e : Espesor [m].

Nu : Número de Nusselt.

Re : Número de Reynolds.

Pr : Número de Prandtl.

Ra : Número de Rayleigh.

R : Resistencia térmica [K/W ó °C/W].

$\epsilon_{\text{cristal}}$ es la emisividad del cristal [-].

ϵ_{placa} es la emisividad de la placa absorbidora [-].

T_{placa} es la temperatura en la placa absorbidora [°C o K].

$T_{\text{cristalinf}}$ es la temperatura en la parte inferior del cristal de la cubierta [°C ó K].

σ es la constante de Stefan-Boltzman, de valor $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

A_{apertura} es el área de apertura del captador (m²).

E_{CC} : Energía demandada en corriente continua [W].

E_{AC} : Energía demandada en corriente alterna [W].

P_{CCi} : Potencia del equipo i de corriente continua [W].

P_{ACi} : Potencia del equipo i de corriente alterna [W].

h_i : Horas de utilización diaria del equipo i.

η_{REG} es el rendimiento del regulador.

η_{INV} es el rendimiento del inversor.

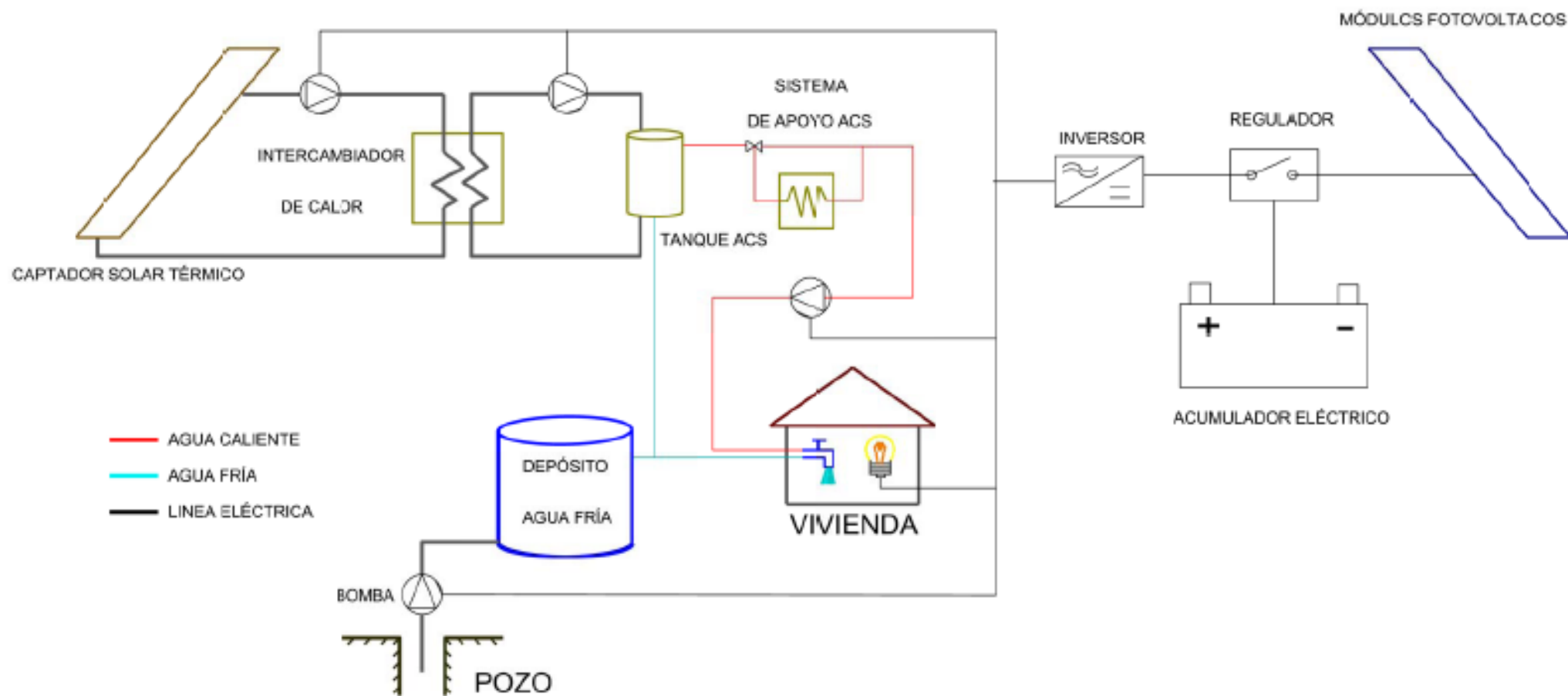
η_{PANEL} : Rendimiento medio del panel fotovoltaico

HSP_{β} : Horas Pico Solar para el ángulo de inclinación β característico de la instalación.

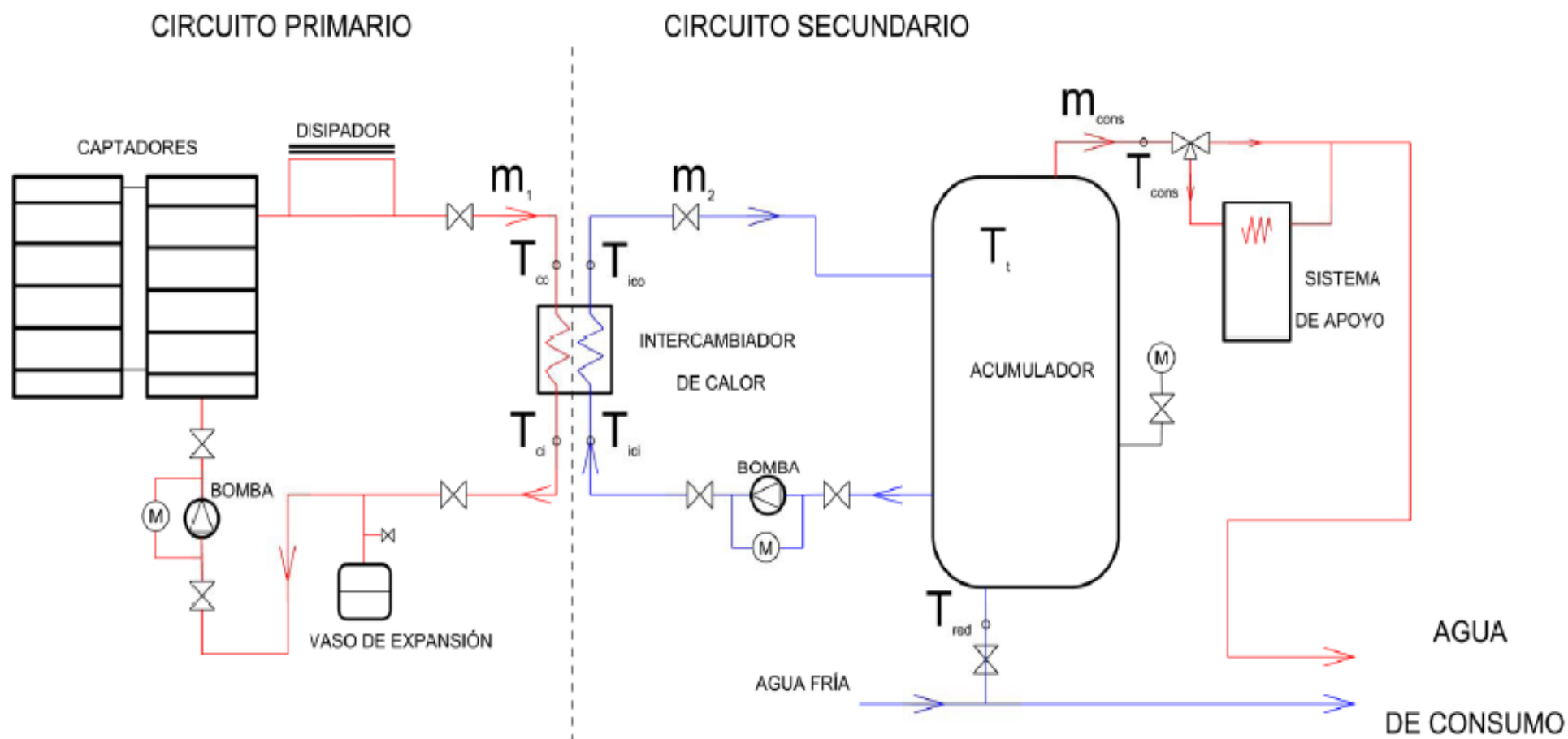
V_n : Tensión nominal del circuito generador [V].

$V_{n \text{ panel}}$: Tensión nominal del módulo fotovoltaico escogido [V].

Además de este epígrafe, en el que se recogen de forma genérica los parámetros que intervienen en las diferentes ecuaciones utilizadas, puede encontrarse una explicación más detallada de los mismos bajo la expresión en la que aparecen a lo largo del texto.



Esquema global de la instalación.



Esquema general de la instalación de ACS.

OBJETIVO DEL PROYECTO

Objetivo del proyecto.

El objetivo del presente proyecto es el diseño de un sistema que, aislado de red, permita el abastecimiento energético de una finca rústica.

Se desea rehabilitar una antigua explotación agrícola, reconstruyendo la vivienda rural y realizando el acondicionamiento para permitir una habitabilidad diaria.

En un principio, se pretende que el total de la energía consumida en la finca sea de origen limpio. Para ello se necesitará a la vivienda de la finca de suministro eléctrico y de agua caliente sanitaria. Ambas instalaciones se implementarán por medio de captadores solares, tanto térmicos como fotovoltaicos. El suministro de agua corriente para uso doméstico es otra de las mejoras que se acometerán.

CAPÍTULO I

Introducción

- 1. Características del emplazamiento.*
- 2. Descripción general de la instalación.*
- 3. Características climáticas.*
- 4. Pérdidas debidas al emplazamiento.*

1. Características del emplazamiento.

a. Localización.

La finca objeto del proyecto se encuentra en la provincia de Cáceres, dentro de la comarca conocida como “La Vera” (40° 7’N, 5° 36’ W). Tiene una extensión de unas 400 Ha y está dedicada a la agricultura, principalmente al cultivo del cereal pero también a la producción de aceituna para su posterior transformación en aceite de oliva. Está comunicada por medio de caminos con las localidades cercanas y no posee ningún tipo de abastecimiento ya sea de aguas o eléctrico de red. Hasta ahora, se obtenía el agua del pozo existente junto a la vivienda mediante una bomba alimentada con un grupo electrógeno, que también suministraba electricidad a la casa cuando era necesario. La calefacción se suministraba mediante la combustión de materia orgánica, principalmente residuos de poda de olivar y encina.

Su actual propietario tiene la intención de rehabilitar la vivienda para su disfrute diario, por lo que necesita dotarla de ciertas comodidades como un abastecimiento eléctrico regular y agua caliente sanitaria (de ahora en adelante ACS). En cuanto a la calefacción, se ha decidido continuar con el sistema de combustión de biomasa procedente de residuos de poda.

Dado que la finca no tiene acceso a la red eléctrica, se utilizarán energías renovables para todos los sistemas mencionados anteriormente. Se opta por energía solar en todas sus variables, en detrimento de otras energías limpias como la eólica. Las principales razones para la elección de este tipo de energía son climatológicas.

El abastecimiento de agua tanto para consumo personal como para el sistema termosolar de ACS será proporcionado por el pozo de la finca. Se pretende diseñar un sistema de extracción alimentado por energía solar fotovoltaica para este fin, que además satisfaga la demanda para consumo propio de la vivienda.

Se muestra a continuación un croquis del emplazamiento de las edificaciones de la finca.

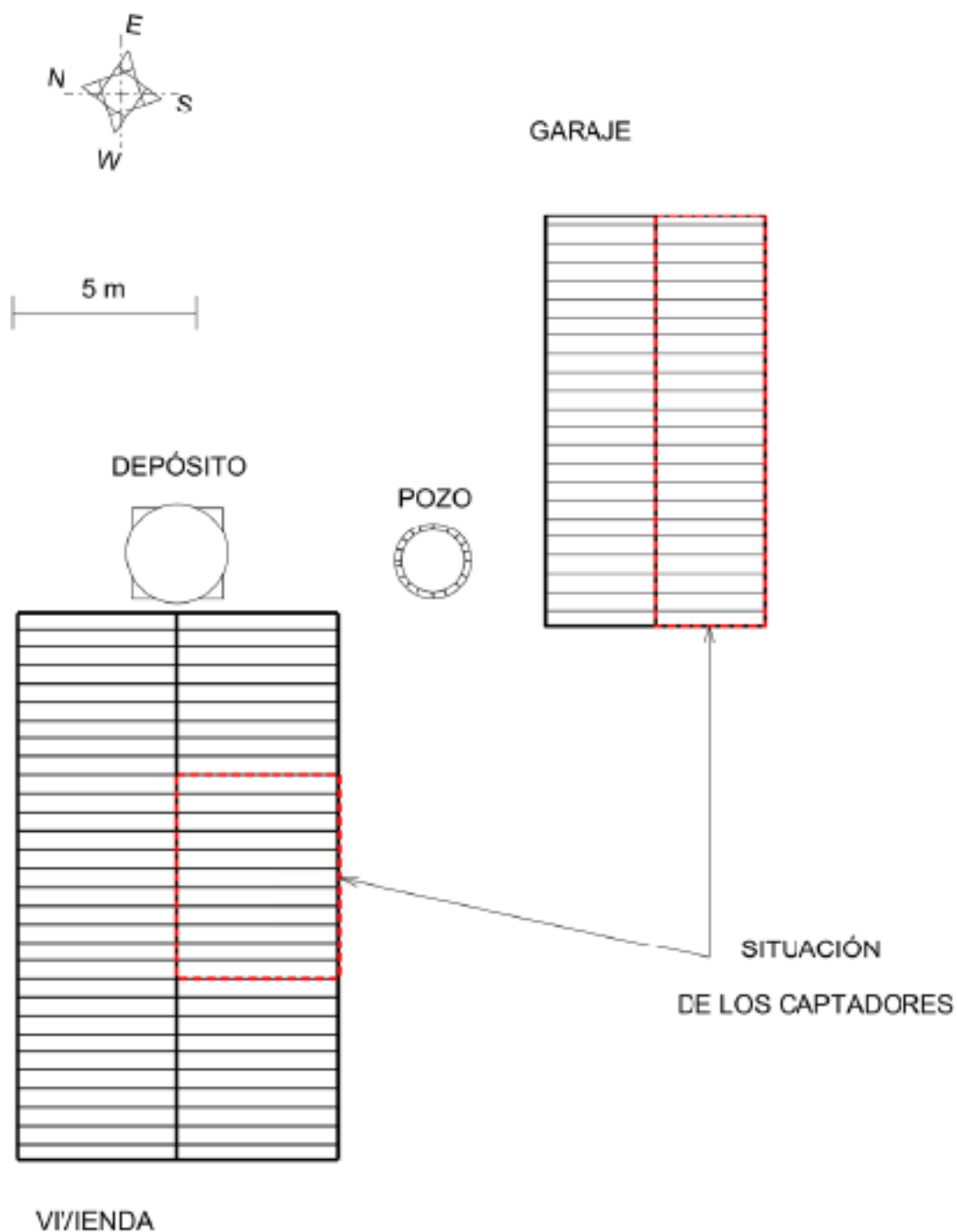


Figura 1.1 Esquema del emplazamiento.

b. Edificaciones.

Las construcciones de que consta la propiedad son una vivienda fruto de la remodelación de una labranza de finales del siglo XIX que se encontraba deshabitada y sólo era utilizada ocasionalmente y un pequeño cobertizo que hacía las funciones de garaje, de construcción posterior e independiente de la vivienda. Ambas edificaciones se encuentran con sus caballetes siguiendo una orientación Este-Oeste prácticamente perfecta. Las características de las dos construcciones se detallan a continuación. Asimismo se muestran croquis de las mismas. Planos detallados pueden consultarse en el Anexo I de este proyecto.

- **Vivienda.**

Se trata de una construcción en una sola altura, con tejado a dos aguas. Tras la remodelación, consta de dos habitaciones, un baño, cocina y salón comedor.

Las aguas del tejado vierten al Norte y al Sur, y es en esta vertiente donde se implantarán los captadores solares de la instalación. Además, se pretende aprovechar el espacio abuhardillado para alojar el resto de la instalación de ACS (Intercambiador, Bombas y Tanque de almacenamiento).

- **Garaje.**

Se trata de una pequeña construcción diáfana, de planta rectangular, con dimensiones de 5 metros de fachada por 10 metros de profundidad, con una superficie, por tanto, de 50 metros cuadrados útiles. Su uso será alojar todos los sistemas de almacenamiento y regulación de la instalación fotovoltaica.

La cubierta es a dos vertientes y con pendiente de 30°.

c. Otros elementos.

Especial importancia en este proyecto tiene el pozo de la finca, que abastecerá de todo el agua necesario tanto para ACS como para consumo humano. Las características del mismo se detallan más adelante en el apartado de bombeo.

2. Introducción a la instalación

La instalación consta de tres sistemas claramente diferenciados aunque relacionados entre sí.

- Sistema de producción de ACS.
- Sistema de bombeo de agua.
- Sistema de producción de energía eléctrica.

Como quedó expuesto en el apartado anterior, se utilizará la energía procedente del sol para, a través de los distintos sistemas de la instalación, dotar a la vivienda de comodidades que permitan su habitabilidad. Se realiza ahora una descripción global de la instalación para proceder a una descripción más detallada de los modos de funcionamiento y elementos característicos cuando se realice el cálculo de cada sistema.

- ***Sistema de producción de ACS.***

Se emplea la energía solar para, mediante captadores solares térmicos, elevar la temperatura del agua hasta la temperatura de consumo del ACS previamente fijada.

El fluido de trabajo, calentado en los captadores, calentará a su vez el agua para el consumo doméstico a través de un intercambiador de calor. El agua calentada de este modo se almacenará para adaptar la producción de ACS a la demanda, ya que éstas no coinciden en el tiempo.

Para los meses donde la producción de ACS no logre alcanzar una temperatura suficiente, un sistema de apoyo proporcionará el calor restante para calentar el agua hasta la temperatura de consumo.

La impulsión de los fluidos por los dos circuitos de este sistema se realiza mediante bombas eléctricas de baja potencia.

- ***Sistema de bombeo.***

El agua demandada por la vivienda, tanto para su utilización a temperatura ambiente como para el funcionamiento del sistema de ACS se extraerá del pozo de la vivienda mediante un sistema de bombeo.

Para ello, se dispondrá una bomba eléctrica de potencia necesaria para elevar el agua desde el fondo del pozo hasta un tanque elevado aledaño a la vivienda. Aseguraremos de esta forma un abastecimiento de agua suficiente para períodos de baja densidad energética.

- ***Sistema de producción de electricidad.***

Mediante módulos fotovoltaicos y el resto de elementos de una instalación solar fotovoltaica de este tipo, como son el regulador, inversor, baterías y las conducciones necesarias, nos encargamos de suministrar energía eléctrica tanto a los sistemas domésticos de la vivienda como al los sistemas de producción de ACS y bombeo.

Un esquema general de la instalación global se muestra en la página siguiente.

3. Características climáticas de la zona.

La vivienda se encuentra dentro de una zona climática tipo V según el CTE. En este caso, se establece que la contribución solar mínima (energía empleada por la instalación que procede del sol) sea del 70%, como puede verse en la tabla adjunta.



Figura 3.1 Zonas climáticas para diseño solar en España

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Para realizar el dimensionado de una instalación solar es de vital importancia conocer los datos climatológicos del emplazamiento, para poder ajustar con mayor precisión el comportamiento del sistema durante su vida útil.

Por ello, se han obtenido datos climatológicos fiables sobre temperatura ambiente durante media durante el día y radiación solar global, así como de la magnitud y dirección del viento en la zona. Éstos datos se recogen en las siguientes tablas.

MES	Radiación (W/m^2)	Temperatura Ambiente (K)
<i>ENE</i>	206,19	281,15
<i>FEB</i>	282,10	282,15
<i>MAR</i>	417,50	286,15
<i>ABR</i>	542,65	288,15
<i>MAY</i>	590,86	292,15
<i>JUN</i>	687,29	297,15
<i>JUL</i>	768,32	300,15
<i>AGO</i>	690,36	296,15
<i>SEP</i>	538,55	296,15
<i>OCT</i>	354,93	290,15
<i>NOV</i>	253,37	285,15
<i>DIC</i>	201,06	281,15

Tabla 3.1 Radiación solar en el plano horizontal y temperatura ambiente medios para cada mes en el emplazamiento localizado

Resultando de estos datos una radiación media de $461,1 W/m^2$ y una temperatura ambiente media durante el día de $289,65 K$ ($16,5^{\circ}C$).

MES	Velocidad del viento (m/s)	Dirección ($N=0^{\circ}$)
<i>ENE</i>	2	233
<i>FEB</i>	2	258
<i>MAR</i>	2,5	295
<i>ABR</i>	2	263
<i>MAY</i>	3	170
<i>JUN</i>	2	159
<i>JUL</i>	2	96
<i>AGO</i>	2	115
<i>SEP</i>	2,5	200
<i>OCT</i>	2,5	270
<i>NOV</i>	3	257
<i>DIC</i>	2,5	196

Tabla 3.2. Velocidad y dirección del viento medias para cada mes en el emplazamiento localizado

4. Pérdidas debidas al emplazamiento

4.1 Pérdidas por inclinación y orientación.

La inclinación y orientación elegida para nuestros captadores diferirá de la óptima. Aunque se acepta tal desviación, las pérdidas por esta causa deben encontrarse dentro de las máximas admisibles. Ambos parámetros vienen definidos por los parámetros β (ángulo de inclinación) y α (azimut), que se definen como sigue:

- *Ángulo de inclinación, β* : Ángulo que forma la superficie de los captadores con el plano horizontal.

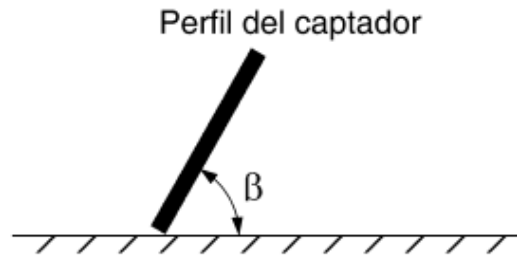


Figura 4.1 *Ángulo de inclinación*

- *Azimut, α* : Ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del captador y el meridiano del lugar. Se tomará el valor de 0° para el Sur, 90° para el oeste y -90° para el este.

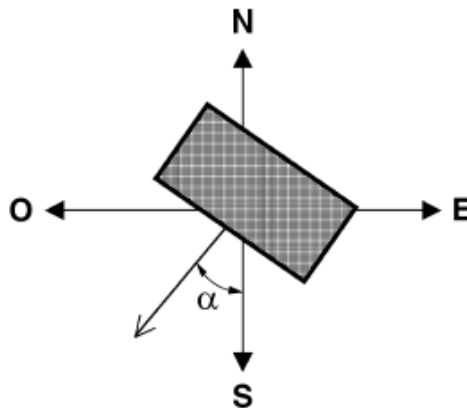


Figura 4.2 *Ángulo de azimut.*

Asimismo, las pérdidas máximas admisibles se encuentran reflejadas en la siguiente tabla. En este caso se aplicarán porcentajes del caso general.

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición	20 %	15 %	30 %
Integración arquitectónica	40 %	20 %	50 %

Tabla 4.1 Pérdidas máximas admisibles

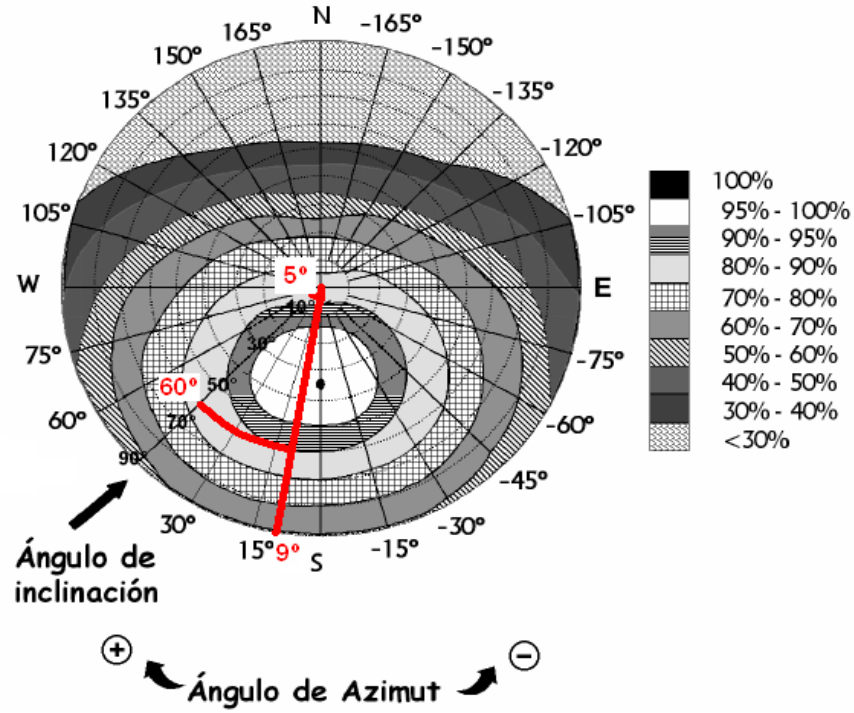
Se considerará como la orientación óptima el sur y la inclinación óptima, dependiendo del periodo de utilización, uno de los siguientes:

- La latitud geográfica para una demanda constante anual.
- La latitud geográfica +10° para una demanda preferente de invierno.
- La latitud geográfica -10° para una demanda preferente de verano.

Dado que debido al clima local la radiación es bastante alta en verano, se optimizará la instalación para los meses invernales colocando los captadores con una inclinación de 50°. Los datos de inclinación de nuestra instalación, tanto para el sistema de captación solar térmica como para el sistema fotovoltaico se muestran a continuación.

	Instalación Fotovoltaica	Instalación Solar Térmica
<i>Inclinación</i>	50°	50°
<i>Azimut</i>	9°	9°

Para cada una de las instalaciones, y con sus respectivos ángulos característicos, entramos con el azimut y el porcentaje máximo de pérdidas en el siguiente diagrama y obtenemos las inclinaciones máxima y mínima para una latitud de 41°.



Las inclinaciones extremas admitidas para cada caso son similares para las dos instalaciones,

$$\beta_{\max} = 60^{\circ} \quad \beta_{\min} = 5^{\circ}$$

Estos límites de inclinaciones aceptables se corregirán para nuestro valor de latitud particular, de 40° , según las expresiones:

$$\beta_{\max} = \beta_{\varphi=41^{\circ}} - (41^{\circ} - \varphi_{\text{propia}}) = 60^{\circ} - (41^{\circ} - 40^{\circ}) = 59^{\circ}$$

$$\beta_{\min} = \beta_{\varphi=41^{\circ}} - (41^{\circ} - \varphi_{\text{propia}}) = 5^{\circ} - (41^{\circ} - 40^{\circ}) = 4^{\circ}$$

Por lo que la inclinación que tienen nuestros captadores se encuentra dentro de las admisibles. Para comprobar más exactamente el porcentaje de pérdidas admitido por la inclinación adoptada puede evaluarse la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas}(\%) = 100 \cdot \left[1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{\text{opt}})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right] = 1,25\%$$

Puede comprobarse que las pérdidas calculadas están dentro de las admisibles para esta instalación.

4.2 Pérdidas de radiación solar por sombras.

Se calcularán en este apartado las pérdidas de radiación solar debidas a sombras circundantes. Para ello se comparará el perfil de obstáculos de los captadores con el diagrama de trayectorias aparentes del Sol.

La localización de los obstáculos que afectan a la superficie de captadores se da en coordenadas de posición azimuth y elevación, y se representarán en la banda de trayectorias del sol a lo largo del año.

En el presente proyecto, los captadores fotovoltaicos no poseen ningún obstáculo en la recepción de radiación solar. Sin embargo, los captadores térmicos se ven ensombrecidos en los primeros momentos del día por el garaje, que alberga los captadores solares, como se muestra en el esquema de implantación del conjunto de edificios.

Conocido el perfil de obstáculos, se representa en el diagrama de trayectorias aparentes del Sol que se muestra a continuación. Cada una de las divisiones del mismo representa una hora solar, y tiene una determinada contribución a la radiación solar global anual que incide en la superficie de estudio. Como referencia para el cálculo se obtiene la tabla más adecuada entre las que incluye el Anexo VI del PCT para Instalaciones de Energía Solar Aisladas de Red.

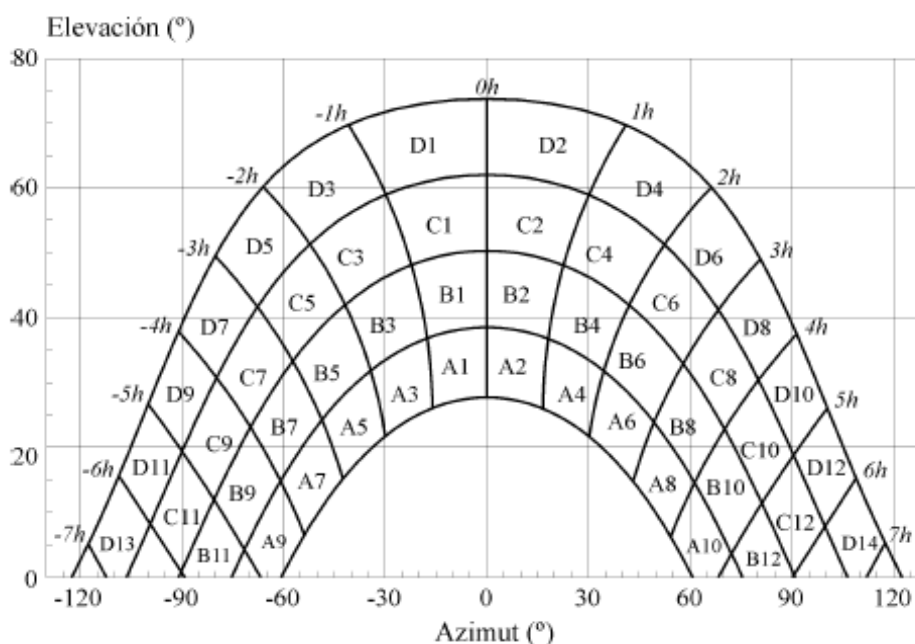


Figura 4.3 Diagrama de trayectorias del Sol.

Tabla 5-A

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,03
11	0,00	0,01	0,12	0,44
9	0,13	0,41	0,62	1,49
7	1,00	0,95	1,27	2,76
5	1,84	1,50	1,83	3,87
3	2,70	1,88	2,21	4,67
1	3,15	2,12	2,43	5,04
2	3,17	2,12	2,33	4,99
4	2,70	1,89	2,01	4,46
6	1,79	1,51	1,65	3,63
8	0,98	0,99	1,08	2,55
10	0,11	0,42	0,52	1,33
12	0,00	0,02	0,10	0,40
14	0,00	0,00	0,00	0,02

Tabla 1.2 Coeficientes de pérdidas por sombreado.

Procedemos a dibujar en la figura la sombra que proyectaría el garaje sobre los captadores del sistema de ACS.

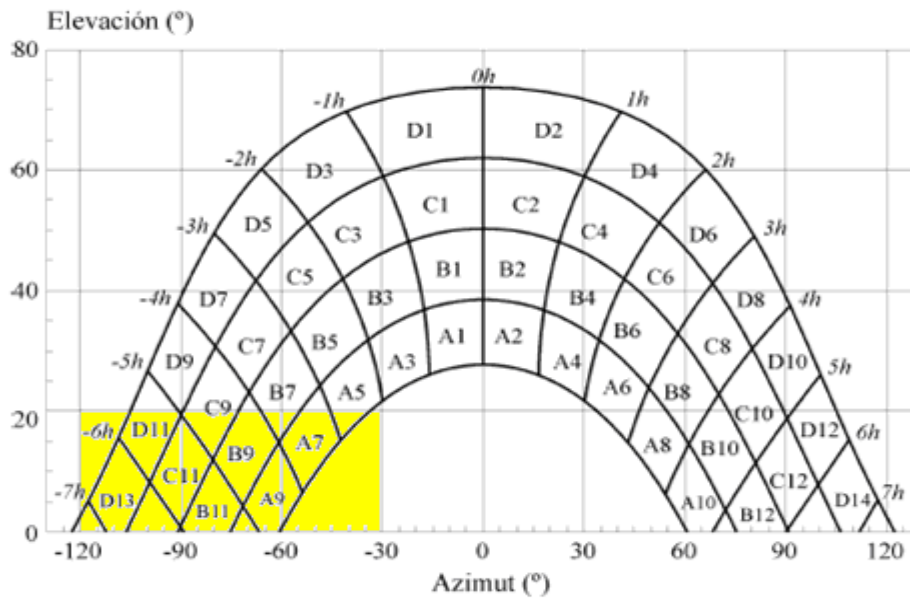


Figura 4.4 Sombras sobre los captadores de ACS

Evaluando la expresión a partir de los coeficientes obtenidos se obtiene el tanto por ciento de pérdidas debidas al sombreado sobre el total de radiación global incidente anual.

$$\begin{aligned}
 \text{Pérdidas}_{\text{sombreado}} (\%) &= \\
 &= 0,75 \cdot D11 + 1 \cdot D13 + 1 \cdot C11 + 0,5 \cdot C9 + 1 \cdot B9 + 1 \cdot B11 + 0,25 \cdot B7 + 1 \cdot A7 + 1 \cdot A9 = \\
 &= 0,75 \cdot 0,44 + 1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 0,62 + 1 \cdot 0,41 + 1 \cdot 0,01 + 0,25 \cdot 0,95 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0,13 = \\
 &= 2,58\%
 \end{aligned}$$

Las pérdidas producidas son menores que las máximas aceptadas por el CTE.

Éstas pérdidas deberán ser tenidas en cuenta para el cálculo de la instalación solar térmica, descontándose de la radiación recibida en todos los cálculos de aquí en adelante para la instalación de ACS.

CAPÍTULO II

Instalación de ACS

- 5. Descripción de la instalación y sus componentes.*
- 6. Demanda de agua para ACS.*
- 7. Demanda energética.*
- 8. Dimensionado de los componentes.*

5. Descripción de la instalación.

El sistema de producción de ACS solar, basa su funcionamiento en la captación de la energía procedente del sol para el calentamiento final de un volumen determinado de agua.

La instalación de ACS consta de dos circuitos diferenciados, denominados circuito primario y secundario respectivamente. Un esquema de la instalación solar de ACS se muestra en la figura de la página siguiente. A continuación, se desglosan los distintos componentes del mismo.

- ***Circuito primario.***

En él se encuentran los captadores solares, el vaso de expansión, disipador del exceso de calor y una bomba que impulsa el fluido del circuito primario a través del mismo. Además, está relacionado con el circuito secundario mediante un intercambiador de calor.

Captadores solares.

Es el elemento fundamental de la instalación. Su función es captar la energía solar incidente y comunicarla al fluido que circula por el circuito secundario.

Existen diferentes tipos de captadores aunque el más común, y al que nos referiremos de ahora en adelante, es el de placa plana.

El captador de placa plana está formado por cuatro elementos principales:

- *Cubierta transparente.* Sobre ella inciden los rayos del sol, provocando el efecto invernadero. Además, reduce las pérdidas y asegura la estanqueidad del captador en unión con la carcasa y las juntas. Se fabrican de vidrio o plásticos transparentes.
- *Placa absorbente o absorbedor.* Su misión es recibir la radiación solar, transformarla en calor y transmitirla al fluido caloportador. Existen distintos modelos, siendo los más típicos una placa metálica soldada sobre una parrilla de tubos o dos placas metálicas separadas unos milímetros entre las cuales circula el fluido caloportador.
- *Aislante.* Para disminuir las fugas de calor del interior del captador se colocan capas de aislante tanto en los laterales como en la cara posterior. Se le exigen una serie de características como por ejemplo: resistir temperaturas de hasta 150°C, no desprender vapores bajo la acción del calor y no perder sus cualidades aislantes en caso de humedecerse.

- *Caja, bastidor o carcasa.* Contiene y soporta todos los elementos anteriores y los protege de la intemperie. Debe ser capaz de resistir las variaciones de temperatura, la corrosión y la degradación química.



Figura 5.1 *Captador solar térmico.*

La radiación solar que llega al captador atraviesa la cubierta transparente, incide sobre la placa absorbente y se transfiere al fluido que circula por el mismo.

Vaso de expansión.

Su función es absorber las dilataciones del fluido contenido en un circuito cerrado producidas por el aumento de temperatura. Los vasos de expansión pueden ser abiertos o cerrados.

Bomba.

Las bombas de circulación son elementos accionados por un motor eléctrico, capaces de suministrar el fluido una cantidad de energía suficiente para hacerlo circular a través de un circuito, venciendo las pérdidas de carga existentes en el mismo.



Figura 5.2 Bomba centrífuga.

Fluido caloportador.

Es el fluido al cual se transfiere la energía recibida por el captador. Fluidos como el agua, o disoluciones de la misma con alcoholes (cuando la temperatura que deben soportar se encuentran por debajo de los 0°C) son los más empleados. Las disoluciones se emplean en instalaciones donde el agua para el consumo del circuito secundario no tiene ningún contacto directo con el fluido caloportador. La transferencia de energía entre el agua y la disolución se hace mediante un intercambiador de calor.

Intercambiador de calor.

Se colocan en una instalación solar cuando se pretende transferir el calor de un fluido a otro sin que estos se mezclen. De esta manera los dos circuitos quedan independizados.

Los intercambiadores utilizados en una instalación solar son intercambiadores líquido-líquido, y pueden ser interiores o exteriores al tanque acumulador. Según su construcción se clasifican en intercambiadores de serpentín helicoidal, de haz tubular, de doble envolvente y de placas.

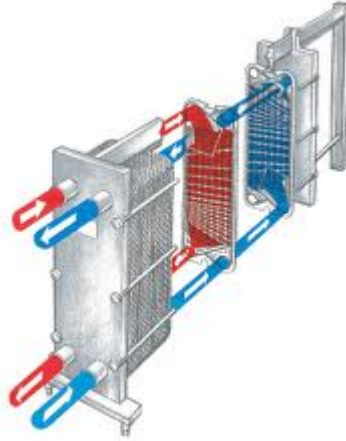


Figura 5.3 *Intercambiador de calor de placas.*

- **Circuito secundario.**

En él se encuentra la parte del intercambiador de calor por la que circula el agua de consumo y el tanque acumulador del agua caliente. Posee, al igual que el circuito primario, una bomba de impulsión. A la salida del tanque se coloca un sistema auxiliar que entra en funcionamiento cuando el sistema solar no ha sido capaz de calentar el agua hasta la temperatura de consumo.

Acumulador

Este elemento se utiliza para adaptar el consumo a la producción de ACS. La necesidad de energía no siempre coincide en el tiempo con la captación procedente del sol, por lo que es necesario disponer de un sistema de acumulación que haga frente a la demanda en momentos de poca o nula radiación solar. Así como en la producción solar en momentos de poco o nulo consumo.

Para los sistemas térmicos se utiliza un depósito-acumulador donde se almacena energía en forma de agua caliente.

La utilización de acumuladores verticales tiene la ventaja de favorecer la estratificación del agua (el agua a mayor temperatura se sitúa en la parte superior del acumulador el agua a menor temperatura en la parte inferior).

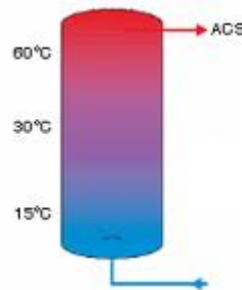


Figura 5.4 *Esquema estratificación en acumulador de ACS.*

Otros elementos

Tanto en el circuito secundario como en el primario, además de los elementos principales ya expuestos podemos encontrar distintos elementos que mejoran el funcionamiento de la instalación

- Aislamiento de tuberías y acumulador.
- Tuberías.
- Válvulas y accesorios.
- Purgadores y venteos.
- Instrumentación (termómetros, termostatos, manómetro e hidrómetro...).

6. Demanda de agua para ACS

La demanda vendrá marcada por el volumen de consumo diario, así como las temperaturas de salida de la instalación y del agua fría.

Según el Pliego de Condiciones Técnicas (PCT) de instalaciones aisladas de red proporcionado por IDAE, el consumo de agua caliente puede estimarse a partir de la siguiente tabla.

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Tabla 6.1. Demanda de referencia a 60°C

Para este proyecto, dado que se trata de una vivienda unifamiliar, requeriría un consumo de 30 litros por persona y día. Corregiremos esta cifra en un 15% para aumentar el nivel de confort. El cálculo del número de personas por vivienda se obviará, ya que se considera una ocupación a efectos de cálculo igual a la máxima de la vivienda (4 personas), superior a las consideraciones mínimas aplicables por el Pliego de Condiciones Técnicas.

Por lo tanto, el consumo diario de ACS será

$$\text{Demanda ACS} = 30 \text{ litros/persona} \times 4 \text{ personas} \times 1,15 = 138 \text{ litros}$$

El Código Técnico de la Edificación en su documento HS4 (Suministro de aguas) en el apartado 2.1.3 punto 4, expone:

“La temperatura de ACS en los puntos de consumo debe estar comprendida entre 50 y 65° excepto en las instalaciones ubicadas en edificios dedicados a uso exclusivo de vivienda, siempre que ésta no afecte al ambiente exterior de dichos edificios.”

Por ello, adoptaremos una **temperatura de referencia** o de salida del intercambiador de **55°C**, tomando las precauciones necesarias para prevenir la aparición de la bacteria Legionella (aislando el circuito y calentándolo hasta 70° durante el tiempo necesario dos veces al año).

Al ser esta temperatura de referencia distinta de la tabulada (60°) habrá que realizar las correcciones oportunas para obtener demanda total para una temperatura de 55°C:

$$D_{55^{\circ}C} = D_{60^{\circ}C} \cdot \frac{(60^{\circ}C - T_F)}{(T - T_F)} = 138 \cdot \frac{(60^{\circ}C - 9.33^{\circ}C)}{(55^{\circ}C - 9.33^{\circ}C)} \approx 150 \frac{l_{ACS}}{día}$$

El **agua fría (T_F)** se tomará directamente de un acuífero subterráneo a través del pozo de bombeo situado junto a la casa. Medidas de temperatura en aguas similares de pozos cercanos dan una temperatura oscilante entre los 7.5° C y los 12°C, utilizándose para los cálculos una temperatura media de **9.33°C**.

La temperatura media del agua de red en la zona es similar a la anterior, pero posee mayor varianza debido a la mayor inercia térmica del suelo que contiene las aguas subterráneas.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	MEDIA
RED	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6	10.3
SUBT.	7.5	8	8	9	10	11	12	11	10	9	8	8	9.33

Tabla6.2. Comparativa entre Temperatura de red y de aguas subterráneas (°C).

Esta demanda tipo anteriormente reflejada debe corregirse en base a la premisa de que la necesidad de ACS no es igual durante todo el año, siendo mayor durante los meses más fríos del mismo. Esta variación estacional se tendrá en cuenta de la forma que se refleja en la siguiente gráfica.

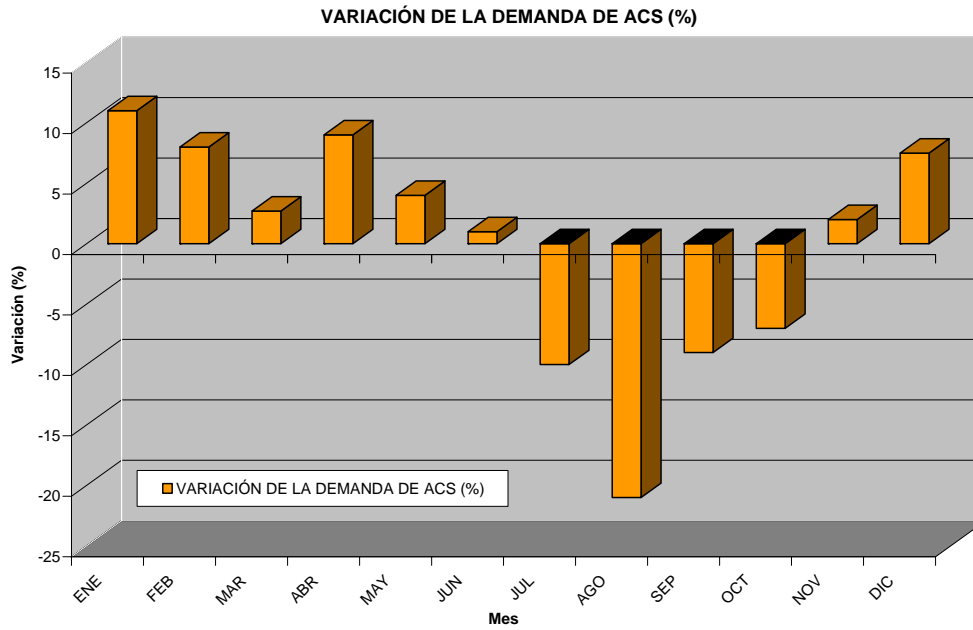


Figura 6.1. Variación estacional (%) de la demanda de ACS

De esta forma, la demanda mensual quedará como sigue:

MES	EN	FE	MA	AB	MA	JUN	JU	AG	SEP	OC	NO	DIC
	E	B	R	R	Y		L	O		T	V	
Variación estacional (%)	+11	+8	+2,7	+9	+4	+1	-10	-21	-9	-7	+2	+7,5
Consumo diario (l/día)	167	162	154	164	156	152	135	119	137	140	153	162

Tabla 6.3 Variación estacional (%) de la demanda de ACS

A partir de este dato se puede calcular el caudal de consumo de la instalación, que vendrá dado por el caudal que debe calentarse durante las horas de sol útiles que reciben los captadores.

El caudal de consumo será por tanto

$$\dot{m}_{cons} = \frac{D_{50^\circ} \cdot \rho_{agua}}{H_{utiles}} \quad [\text{kg/s}]$$

La siguiente tabla recoge los valores tanto del caudal de consumo como de las horas solares útiles. La densidad del agua se supone constante y de valor 1000 kg./m³.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H_{UTILES}	8	9	9	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9	9	8	7.5
\dot{m}_{cons} (x10⁻³)	5,78	5	4,75	4,78	4,56	4,43	3,95	3,46	4,21	4,31	5,31	5,97

Tabla 6.3 Caudal de consumo mensual

Para efectuar el dimensionado previo de la instalación se tomará como caudal másico de consumo la media de éstos valores, siendo

$$\dot{m}_{cons} = 4,71 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kg/s}]$$

7. Demanda energética

Establecido un consumo diario de 150 litros de agua caliente sanitaria, se procede al cálculo de la energía necesaria para suministrar el agua a 55°C. Esta energía puede evaluarse mediante

$$Q = D_{55^{\circ}} \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua}}} \cdot (T_{\text{sum}} - T_{\text{red}})$$

Donde:

$D_{55^{\circ}}$ es el volumen de agua a 55° requerido.

ρ_{agua} es la densidad del agua.

$C_{p_{\text{diario}}}$ es el calor específico del agua, 4,18 KJ/kg.K

T_{sum} es la temperatura a la que se desea suministrar el ACS.

T_{red} es la temperatura del agua fría.

De esta expresión se obtiene la energía necesaria para suministrar la demanda diaria de ACS. Extrapolando para todo el año, con las temperaturas medias de agua de red de cada mes y su número de días (N), se obtiene la información resumida en la siguiente tabla. Tanto el rango de temperaturas del agua de red como la demanda estacional de ACS quedaron establecidos en el apartado anterior y son por tanto conocidos.

MES	D _{50°} (litros)	N (días)	T _{sum} (°C)	T _{red} (°C)	Q (MJ)
ENERO	167	31	55	7.5	974,7
FEBRERO	162	28	55	8	861,7
MARZO	155	31	55	8.5	933,3
ABRIL	164	30	55	9	883,1
MAYO	156	31	55	10	891,8
JUNIO	152	30	55	11	843,0
JULIO	135	31	55	12	850,3
AGOSTO	119	31	55	11	860,7
SEPTIEMBRE	137	30	55	10	863,0
OCTUBRE	140	31	55	9	912,5
NOVIEMBRE	153	30	55	8	913,2
DICIEMBRE	162	31	55	8	974,7
TOTAL					10.762

Tabla 7.1 Demanda energética anual.

Así pues, la instalación debería suministrar un total de **10.762 MJ**, cubriendo además la totalidad de la demanda mensual. Esto llevaría a una gran superficie de captadores, con grandes costes de instalación y mantenimiento y con un grave problema de excedente energético en los meses de mayor radiación que repercutiría en un peligroso aumento de la presión en los captadores y el resto de los componentes de la instalación.

Es por estas razones que el dimensionado de la superficie de captadores se realizará sobre un caudal de consumo y una temperatura de agua de red medios. Con esta hipótesis se penaliza la instalación en invierno, ya que será necesaria una fuente auxiliar para proporcionar el calor restante hasta que la temperatura de salida del tanque de ACS llegue a la temperatura de consumo seleccionada. Sin embargo, en los meses más calurosos se evita un sobredimensionado de los componentes con el consiguiente ahorro en componentes y un excedente energético menor.

8. Dimensionado de la instalación.

8.1 Dimensionado previo del campo de captadores

Procedemos ahora al cálculo de la superficie mínima de captadores necesaria para cumplir con los requerimientos energéticos de la instalación. Inicialmente realizaremos este cálculo basado en un balance energético en los distintos componentes de la instalación de ACS.

En este primer balance, se supondrá que las pérdidas en los captadores se ajustan a los datos aportados por el fabricante. Con estos datos de partida se calculará la superficie mínima de captadores a través de la media anual de todos los parámetros involucrados (Radiación, Temperatura ambiente, temperatura del agua de red y demanda de agua).

Posteriormente se realizará una comprobación de los resultados a mediante un cálculo manual de las pérdidas en el captador solar. Este chequeo se efectúa debido a que las condiciones de las pruebas a las que se someten los captadores frecuentemente no coinciden con las condiciones a las que el captador tiene que hacer frente durante su vida útil. El factor más determinante es el viento. Generalmente, los ensayos realizados para categorizar los distintos colectores solares del mercado no tienen en cuenta el viento en sus cálculos (como por ejemplo la norma estadounidense ASHRAE 93), mientras que en otros casos se utiliza un modelo casi-estacionario que permite utilizar datos para pérdidas de viento de 1 a 4 m/s (Norma Europea EN-12975-2).

A esta corrección, si fuese necesaria, de la superficie mínima de captadores, le sigue un cálculo a partir del área seleccionada para cada mes del año, y una evaluación de resultados.

Hipótesis previas

Fluido caloportador

Este fluido recoge la energía procedente del sol y la transmite al agua a calentar a través del intercambiador de calor que separa los circuitos primario y secundario.

Entre sus características debe encontrarse una alta conductividad térmica, así como un gran rango de aplicación, entre su temperatura de congelación y de ebullición.

En la instalación que nos ocupa, conocemos que la temperatura mínima histórica para la zona ha sido de -9°C . Por el contrario, es totalmente desconocida la temperatura máxima en los captadores, que debe ser inferior a la temperatura de ebullición del fluido caloportador y estar además dentro de su rango de trabajo para evitar la descomposición.

Teniendo esto en cuenta se escoge como fluido caloportador una disolución comercial de Propilenglicol al 37% (Glicosolar), cuyas características se detallan a continuación. Se realizará posteriormente la comprobación de que el fluido del circuito primario no excede nunca la temperatura de ebullición.

- Concentración de propilenglicol en la solución del 37%.
- Punto de ebullición 104°C .
- Punto de congelación -18°C .
- Totalmente biodegradable.
- Evita corrosión en los circuitos.
- Evita fangos de barros en el circuito refrigerante.
- Ayuda a la detección de fugas, ya que contiene aditivo visible con luz UV.

Las características del fluido escogido se muestran en las siguientes figuras, estableciéndose para la concentración establecida una temperatura máxima de trabajo de 104°C .

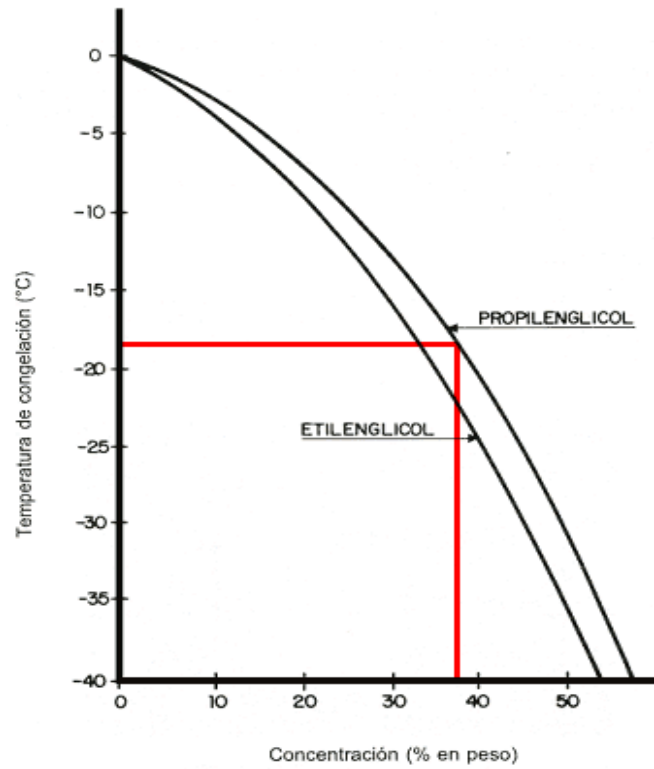


Figura 8.1 Características de congelación del propilenglicol al 37%

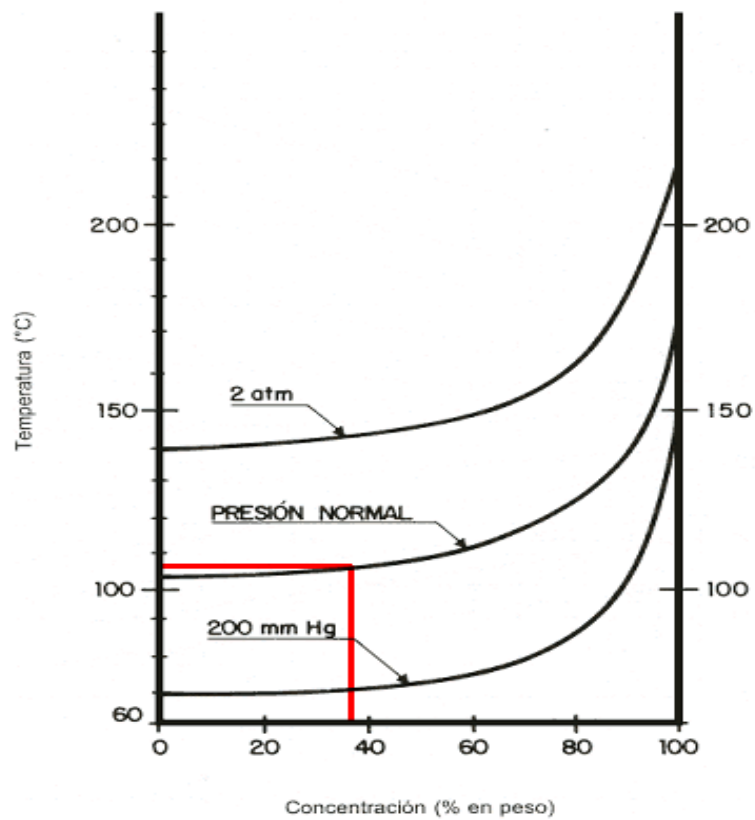


Figura 8.2 Características de ebullición del propilenglicol al 37%

Captadores escogidos.

Para el cálculo inicial de la superficie de captadores necesaria para nuestra instalación realizamos un balance energético entre los diferentes elementos de la misma. Previo a este balance habrá que establecer unas condiciones de funcionamiento del campo de captadores.

El modelo de captador seleccionado es de tipo vertical, ISOFOTON ISOTHERM con los siguientes parámetros característicos (se realizará una descripción más detallada en apartados siguientes):

- Caudal volumétrico nominal: 50 litros/hora (Por m²)
- Caudal másico nominal: 13,88 E⁻³ kg/s
- Área del absorbedor: 2,21 m².
- Factor de eficiencia: 0,811.
- Coeficiente de pérdidas lineal: 3,653 W/m²K.
- Coeficiente de pérdidas secundario: 0,0146 W/m²K².

El caudal en el circuito secundario se supone el mismo que en el circuito primario. El fluido de trabajo en el circuito primario debe resistir temperaturas por debajo de 0°C como se expuso anteriormente. El calor específico del mismo utilizado para estos cálculos será de 3,8 KJ/kg.K.

El caudal de consumo a será el valor medio anual, al igual que la temperatura de agua fría y la temperatura ambiente. Como ya se ha expuesto la temperatura de consumo será de 55°C.

$$\dot{m}_{cons} = 4,71 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \quad \bar{T}_{red} = 9,33^{\circ}C \quad \bar{T}_{amb} = 16,5^{\circ}C \quad T_{cons} = 55^{\circ}C$$

Se discute ahora la inclinación previa para los captadores. Esta inclinación afecta a la radiación que incide en ellos mediante un coeficiente K_{β} característico para cada inclinación. Para elegir la inclinación que mejor convenga a nuestros propósitos se compara la radiación global recibida para el rango de inclinaciones más apropiado para la latitud en la que nos encontramos, que va desde los 30° a los 50°.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0°	201	275	407	529	576	670	749	673	525	346	247	196
30°	269	347	476	566	582	657	756	734	630	464	353	276
35°	275	352	476	561	564	637	734	720	635	474	363	284
40°	279	355	472	550	547	616	712	707	635	481	371	290
45°	281	355	468	534	524	590	689	693	630	481	375	294
50°	283	352	460	518	501	556	652	666	620	481	380	298
55°	281	349	448	497	472	523	614	639	604	477	380	298

Tabla 8.1 Radiación recibida (en W/m^2) en función de la inclinación de los captadores.

La información recogida en la tabla se muestra de forma más intuitiva en el siguiente gráfico, donde se muestra la radiación incidente en el emplazamiento de la instalación en relación a la inclinación de los paneles.

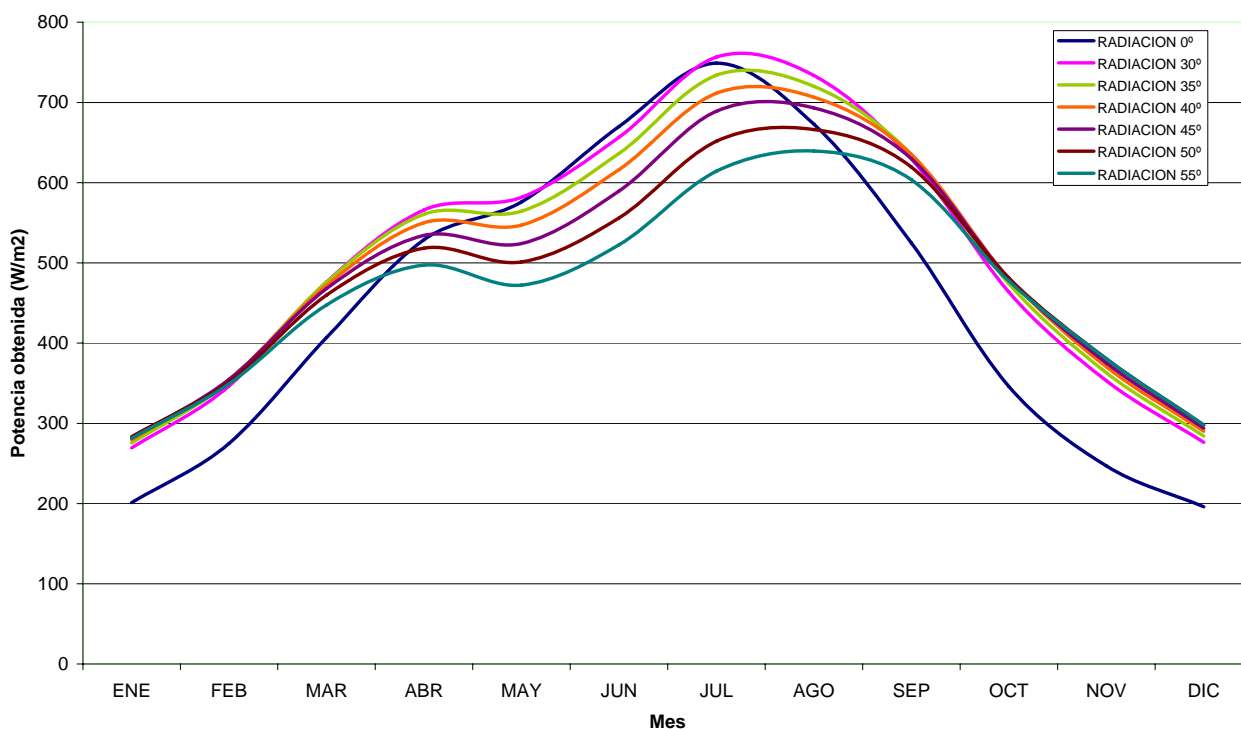


Figura 8.3 Influencia de la inclinación en la radiación recibida.

De instalaciones en emplazamientos similares se sabe que la energía aportada por la instalación en los meses más cálidos sobrepasa ampliamente la demandada. Por ello nos centramos en optimizar la instalación para los meses de invierno, tomándose una inclinación que maximice la radiación incidente en los captadores durante los meses más fríos. Esta inclinación sería entonces de 50°.

Sin embargo, si comparamos las ganancias (o pérdidas) relativas entre distintas inclinaciones para esta localización concreta, puede llegarse a la conclusión de que las ganancias de la inclinación de 50° en los meses de invierno (alrededor de un 3% mensual) no compensan las pérdidas de hasta un 10% con respecto a la inclinación óptima (40°) en verano. La realidad es que la demanda de agua caliente en verano decae hasta en un 21% (Agosto) frente al aumento de un 11% en invierno (Enero), y esta condición hace finalmente que la inclinación adoptada para nuestros captadores sea de 50° .

Posteriormente se evaluará con la superficie escogida para comprobar la validez de la elección.

8.1.1 Planteamiento del problema.

Para evaluar la superficie de captadores necesaria nos ayudamos de nuevo del programa de cálculo matemático MathCAD. Con él resolvemos el sistema de ecuaciones que supone el balance de energía en todos los componentes de la instalación.

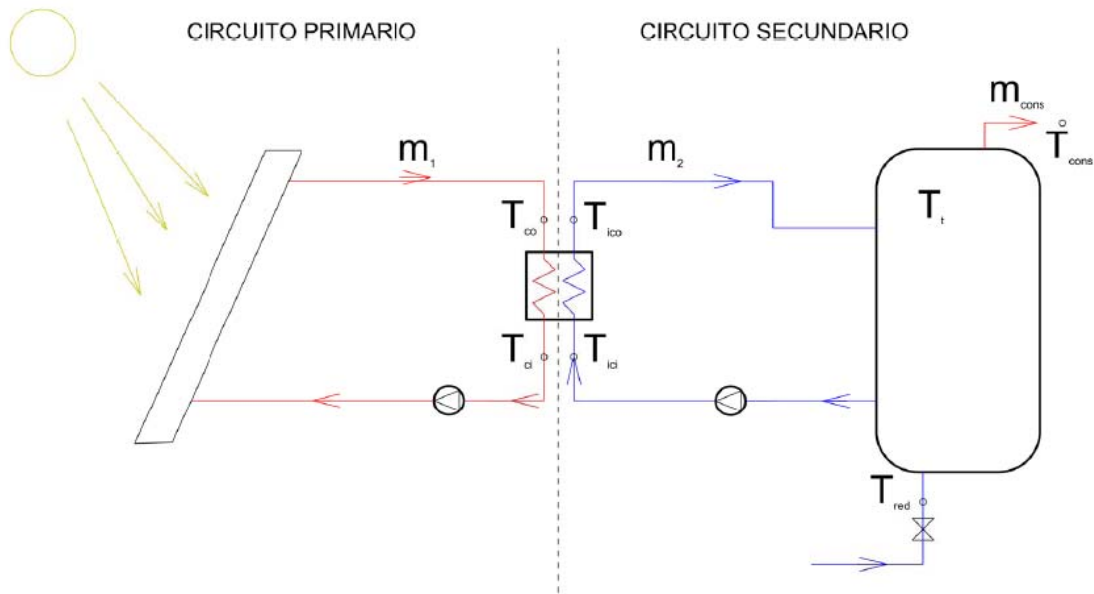


Figura 8.4 Esquema simplificado de la instalación de ACS

- **Balance energético en los captadores.**

Se aplicará un balance energético en estado estacionario, esto es, cuando la variación temporal de las propiedades de los captadores sea nula. La energía que entra será la aportada por el sol en forma de radiación y la aportada por el caudal entrante, mientras que la energía que sale vendrá dada por las pérdidas propias del captador y por la energía que escapa por el caudal saliente. La ecuación resultante es

$$\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = I_t \cdot A_c \cdot \eta_T$$

Donde:

\dot{m}_1 es el caudal másico que circula por el circuito primario.

c_{p1} es el calor específico del fluido del circuito primario.

T_{co} es la temperatura de salida del colector del fluido caloportador.

T_{ci} es la temperatura de entrada en el colector del fluido caloportador.
 I_t es la radiación total recibida
 A_c es la superficie del campo de colectores
 η_T es el rendimiento total del captador.

La radiación total I_t se obtiene aplicando el coeficiente de corrección debido a la inclinación de las placas, $I_t = I_{horizontal} \cdot K_\beta$.

En cuanto al término relativo a las pérdidas en los colectores solares, en este primer balance admitiremos las pérdidas dadas por la curva de rendimiento del fabricante. De esta forma, las pérdidas se expresan según el rendimiento total del captador de la forma

$$\eta_T = (a_{00} - \frac{T_{ci} - T_{co}}{I_t} \cdot a_{11})$$

Donde:

η_T es el rendimiento total del captador.
 a_{00} es el rendimiento óptico del captador.
 a_{11} es el coeficiente de pérdidas del captador [W/K].

- **Balance energético en el intercambiador de calor.**

El balance en el intercambiador de calor supone trasvase de energía entre el fluido del circuito primario y el circuito del fluido secundario.

$$\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici})$$

Donde:

\dot{m}_1 , c_{p1} , T_{co} y T_{ci} quedaron definidas anteriormente.
 \dot{m}_2 es el caudal másico que circula por el circuito secundario.
 c_{p2} es el calor específico del fluido del circuito secundario.
 T_{ico} es la temperatura de salida del intercambiador del fluido caloportador.
 T_{ici} es la temperatura de entrada en el intercambiador del fluido caloportador.

Además de éste balance, debe definirse un parámetro importante del intercambiador como es su eficiencia. Esta característica del intercambiador es un valor porcentual que generalmente está comprendido entre el 70 y el 80%.

Como una primera hipótesis se tomará el valor de 0,7 para posteriormente imponer esta condición en la elección del intercambiador adecuado a la instalación.

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{c_{pmin} \cdot (T_{co} - T_{ci})}$$

Donde:

ε es la eficiencia del intercambiador de calor.

c_{pmin} es el valor mínimo entre el calor específico del fluido del circuito primario y el del secundario.

El resto de parámetros quedaron previamente definidos.

• Balance energético en el tanque de almacenamiento

El balance en el depósito dependerá de las entradas y salidas del agua del mismo, tanto hacia el consumo como hacia el intercambiador.

$$\dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) = \dot{m}_{cons} \cdot c_{pcons} \cdot (T_{cons} - T_{red})$$

Donde:

\dot{m}_{cons} es el caudal másico de consumo.

c_{pcons} es el calor específico del fluido de consumo, agua.

T_{cons} es la temperatura de salida del tanque hacia el consumo.

T_{red} es la temperatura del agua fría extraída del pozo.

Además del balance en el tanque de almacenamiento, se tendrá en cuenta la distribución de temperaturas en su interior, o grado de estratificación. La temperatura en el tanque será una función de su coordenada vertical, creciendo con la misma. Por tanto la base del tanque estará más fría que su zona superior.

Si el fluido en el interior del depósito se encuentra totalmente mezclado, se tiene

$$T_t = \frac{(\dot{m}_2 \cdot T_{ico}) + (\dot{m}_{cons} \cdot T_{red})}{(\dot{m}_2 + \dot{m}_{cons})}$$

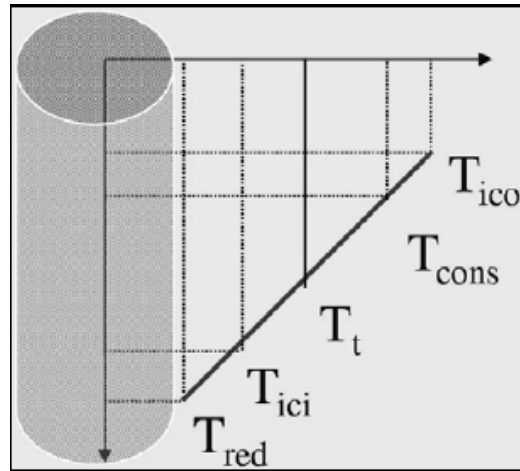


Figura 8.5 Grado de estratificación.

Ahora bien, si se tiene la precaución de que caudales entrantes y salientes no agiten en exceso el interior del depósito, éste no llegará a una mezcla total y se encontrará estratificado. El grado de estratificación (E) estará comprendido entonces entre 0 y 1, (donde $E=0$ indicaría que el tanque no está estratificado y $E=1$ que el tanque estaría totalmente estratificado). Se define el grado de estratificación entonces como

$$E = \frac{T_{cons} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

- **Fracción solar.**

La fracción solar es el porcentaje de la energía requerida por la instalación que es aportada por la instalación solar. Como ya se expuso anteriormente, el emplazamiento de este proyecto se encuentra en una zona IV según el Código Técnico de la Edificación en su documento DB HE 4. Esta localización impone una fracción solar de 0,7 para nuestra instalación, es decir, un 70% de la demanda energética debe ser cubierta por la energía obtenida del sol.

Esta fracción solar se expresa de la forma

$$f = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

8.1.2 Resolución

La resolución del sistema de ecuaciones resultante de plantear el balance energético de la instalación se resuelve con ayuda del programa informático MathCAD. Para esta primera aproximación se utilizan los valores medios de temperaturas (ambiente y de red), caudal de consumo y radiación. En el ANEXO se encuentra el programa utilizado. Los resultados obtenidos se muestran recogidos en la siguiente tabla.

T_{co}	(Temperatura de salida del captador)	318,61 K
T_{ci}	(Temperatura de entrada en el captador)	313,26 K
T_{ico}	(Temperatura de salida del intercambiador)	315,85 K
T_{ici}	(Temperatura de entrada en el intercambiador)	310,96 K
T_{cons}	(Temperatura de consumo)	314,52 K
T_t	(Temperatura del tanque)	311,44 K
A_c	(Área de colectores necesaria)	2,1 m ²

Tabla 8.2 Resultados del problema.

La superficie de captación del colector escogido es de 2,21 m² por panel, por lo que, en un principio, bastará con un solo captador. Seguidamente realizamos la valoración de pérdidas en los distintos elementos de la instalación.

4.2 Pérdidas de calor en los captadores

La evaluación de las pérdidas en los captadores puede realizarse recurriendo a dos métodos diferentes, el dado por la curva de rendimiento proporcionada por el fabricante y el método de resistencias térmicas. Los datos dados por el fabricante dependerán de las condiciones de ensayo del captador, que en raras ocasiones coincidirán con las condiciones de la instalación. Por ello, aplicaremos aquí el método de las resistencias térmicas.

4.2.1 Método de las resistencias térmicas.

Este método se esquematiza en un gráfico similar a un esquema de resistencias eléctricas donde cada resistencia refleja la capacidad de cada componente del colector para impedir el paso del flujo de calor. Los distintos procesos de transferencia de calor que tienen lugar en el captador se reflejan a continuación para posteriormente indicarse de un modo gráfico todas las resistencias térmicas.

PROCESO	LOCALIZACIÓN
CONDUCCIÓN	Caja Aislante Tubos Absorbedor Cristal
CONVECCIÓN	Parte posterior de la caja – Ambiente (Forzada) Convección en el fluido caloportador Parte superior del cristal – Ambiente (Forzada)
RADIACIÓN	Entre placa absorbedor - Cubierta. Parte superior del cristal de la cubierta - Cielo.

Tabla 8.3 *Modos de transferencia de calor en captadores.*

Resistencias térmicas.

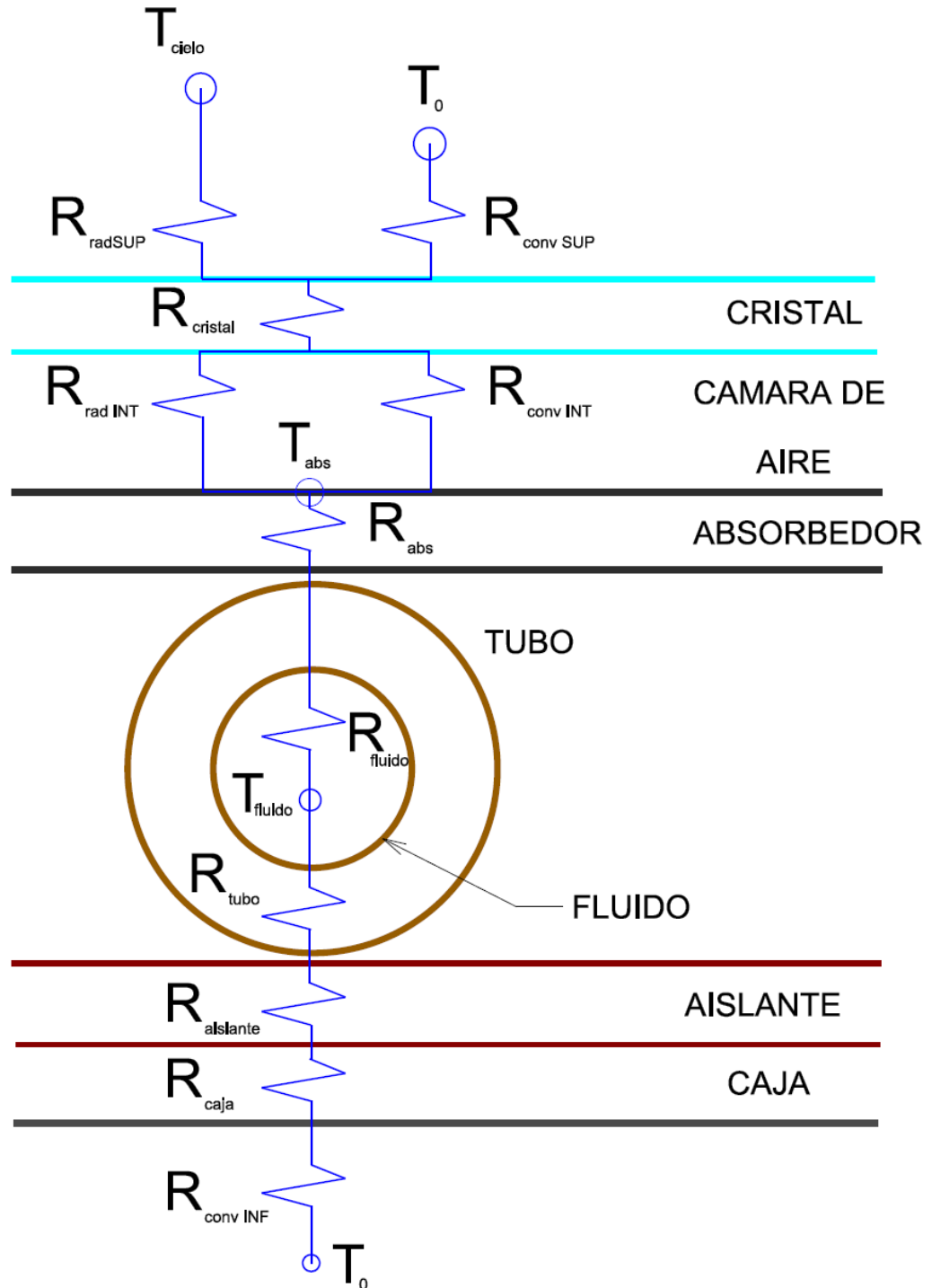


Figura 8.6 Esquema de resistencias térmicas en un captador.

Las resistencias térmicas de la figura se definen a continuación.

- **Convección en la parte inferior de la caja.**

La resistencia térmica de convección en la parte posterior de los colectores se calcula como sigue:

$$R_{tconv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A_{apertura}}$$

Donde:

h_{conv} es el coeficiente de convección del aire [W/m^2K].

A_{CAJA} es la superficie de apertura del captador [m^2].

El proceso de convección, tanto en la parte posterior del captador como en su parte superior, es forzado. La velocidad del viento, reflejada en capítulos anteriores, favorece una pérdida de calor. Para cuantificar este efecto calculamos las propiedades de la corriente de aire sobre el captador, comenzando por su número de Reynolds (Re).

$$Re_{conv} = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{aire} \cdot L_c}{\mu_{aire}}$$

Donde:

ρ_{aire} es la densidad del aire [kg/m^3].

V_{aire} es la velocidad del aire [m/s].

μ_{aire} es la viscosidad dinámica del aire [Ns/m^2].

L_c es la longitud característica del colector [m].

La longitud característica en este caso se corresponderá con el ancho del colector.

Conocido el número de Reynolds determinamos el número de Nusselt (Nu). Para su cálculo será necesario conocer la dirección del viento, determinante para conocer la correlación que debemos aplicar según [11]. Con los datos de viento del emplazamiento y ayudados por un programa disponible en la web de *Danish Wind Industry Association* se obtiene la rosa de los vientos característica de esta situación.

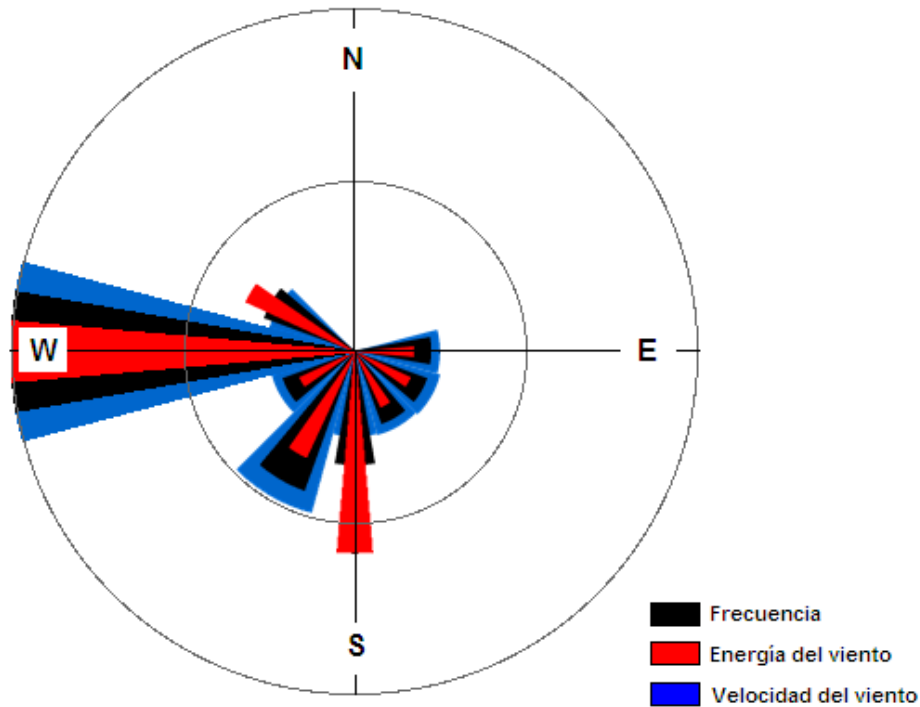


Figura 8.7 Dirección del viento incidente en el colector.

Como puede comprobarse, la contribución mayoritaria del viento proviene del oeste, por lo que el flujo de aire será perpendicular al colector, y la correlación de Nusselt a aplicar es

$$Nu_{CAJA} = 8.948 \cdot Re_{conv}^{0.385} \cdot Pr_{aire}^{1/3}$$

El número de Prandtl (Pr) característico de este flujo de aire se obtiene de las tablas de propiedades del mismo, aceptando un valor medio de $Pr = 0.705$.

Finalmente, el coeficiente de convección es

$$h_{conv} = \frac{Nu_{CAJA} \cdot k_{aire}}{L_c}$$

La resistencia térmica de convección entre la parte posterior del captador y el ambiente no es única y dependerá de las condiciones de temperatura y velocidad del viento.

- **Conducción en la caja.**

La resistencia de conducción en la caja se calcula mediante la siguiente expresión

$$R_{CAJA} = \frac{e_{CAJA}}{k_{CAJA} \cdot A_{apertura}}$$

Donde:

e_{CAJA} es el espesor de la pared del fondo del colector (sin aislante) [m].

A_{CAJA} es la superficie de apertura del captador [m²].

k_{CAJA} es la conductividad térmica del material de la caja [W/mK].

Introduciendo los valores dados por el fabricante del colector se tiene una resistencia térmica de valor

$$R_{CAJA} = 16,7 \cdot 10^{-5} \frac{W}{K}$$

- **Conducción en el aislante.**

La resistencia de conducción en la lámina de material aislante que se encuentra recubriendo el interior del captador se calcula de forma similar a la resistencia de conducción de la caja, esto es

$$R_{AISLANTE} = \frac{e_{AISLANTE}}{k_{AISLANTE} \cdot A_{apertura}}$$

Donde:

$e_{AISLANTE}$ es el espesor del aislante en el fondo del colector [m].

A_{CAJA} es la superficie de apertura del captador [m²].

$k_{AISLANTE}$ es la conductividad térmica del aislante [W/mK].

Sustituyendo por los valores propios del captador se tiene,

$$R_{AISLANTE} = 0,756 \frac{W}{K}$$

- **Conducción en los tubos.**

La resistencia térmica de conducción en los tubos del captador difiere de las resistencias térmicas de conducción anteriores por las características geométricas de los mismos. Así, teniendo en cuenta su forma cilíndrica se calcula la resistencia térmica como

$$R_{tubo} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{tubo} \cdot L_{tubo} \cdot N_{tubos}}$$

Donde:

D_{ext} es el diámetro externo del tubo [m].

D_{int} es el diámetro interno del tubo [m].

k_{tubo} es la conductividad térmica del aislante [W/mK].

L_{tubo} es la longitud del tubo [m].

N_{tubos} es el número de tubos paralelos que componen el colector.

La resistencia térmica en los tubos tiene un valor de

$$R_{tubo} = 2,65 \cdot 10^{-6} \frac{W}{mK}$$

- **Convección en el fluido caloportador.**

La resistencia térmica de convección del fluido caloportador en el interior de los tubos del captador se calcula como sigue

$$R_{fluido} = \frac{1}{h_{int} \cdot \pi \cdot D_{int} \cdot L_{tubo} \cdot N_{tubos}}$$

Donde:

h_{int} es el coeficiente de convección del fluido [W/m²K].

D_{int} es el diámetro interno del tubo [m].

L_{tubo} es la longitud del tubo [m].

N_{tubos} es el número de tubos paralelos que componen el colector.

De nuevo debe calcularse el número de Reynolds (Re) característico del flujo en el interior del tubo. En este caso el fluido es una disolución de propilenglicol que tiene las siguientes propiedades:

$$Re_{fluido} = \frac{\rho_{fluido} \cdot V_{fluido} \cdot D_{int}}{\mu_{fluido}} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{int} \cdot \nu}$$

Donde:

ρ_{fluido} es la densidad del fluido caloportador [kg/m³].

V_{fluido} es la velocidad del fluido en los tubos [m/s].

μ_{fluido} es la viscosidad dinámica del fluido caloportador [Ns/m²].

D_{int} es el diámetro interno de los tubos [m].

\dot{m} es el caudal másico que circula por el colector [kg/s].

ν es la viscosidad cinemática del fluido [m²/s].

Conocido el número de Reynolds, y teniendo en cuenta que pertenece a un régimen turbulento en el interior de los tubos, la correlación a aplicar para obtener el número de Nusselt será la ecuación de Dittus-Boelter

$$Nu_{fluido} = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,4}$$

El coeficiente de convección, necesario para calcular la resistencia térmica es

$$h_{conv} = \frac{Nu_{fluido} \cdot k_{fluido}}{D_{int}}$$

- **Conducción en la placa absorbadora**

La resistencia térmica por conducción en la placa del absorbador no puede calcularse como una resistencia térmica por conducción cualquiera. La transferencia de calor no lineal hace que sea necesario un balance energético en la placa entre la temperatura de la misma y la temperatura media del fluido circulante por los tubos. Datos experimentales [11] arrojan un valor de la resistencia térmica

$$R_{placa} = 0,012 \frac{K}{W}$$

- **Convección entre la placa absorbadora y el cristal de la cubierta**

El mecanismo que gobierna la transferencia de calor entre estas dos placas es la convección natural. La resistencia térmica de convección se calcula por tanto

$$R_{tconv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A_{apertura}}$$

La convección natural del aire en el interior de estas dos placas se asemeja al flujo en una cavidad rectangular inclinada, utilizándose la siguiente correlación empírica para el cálculo del Nusselt

$$Nu_l = 4,328 \cdot 10^{-10} \cdot Ra_l^2 - 1,478 \cdot 10^{-6} \cdot Ra_l + 1,001$$

Donde Ra es el número de Rayleigh, que se define como sigue

$$Ra_l = \frac{g \cdot \beta_{aire} \cdot L_{camara}^3 \cdot (T_{placa} - T_{cristal\ inf})}{\alpha_{aire} \cdot \nu_{aire}}$$

Donde:

g es la aceleración gravitatoria [m/s^2].

β_{aire} es el cociente volumétrico de expansión térmica [$1/K$].

L_{camara} es el espesor de la cavidad [m].

T_{placa} es la temperatura en la placa absorbadora [K].

$T_{cristal\ inf}$ es la temperatura en la parte inferior del cristal de la cubierta [K].

ν_{aire} es la viscosidad cinemática del aire encerrado [m^2/s].

α_{aire} es la difusividad del aire en el interior de la cámara [m^2/s].

- **Radiación entre la placa absorbadora y el cristal de la cubierta**

La resistencia de radiación entre estas dos placas es

$$R_{radl} = \frac{(\varepsilon_{cristal} + \varepsilon_{placa} - \varepsilon_{cristal} \cdot \varepsilon_{placa})}{\varepsilon_{cristal} \cdot \varepsilon_{placa} \cdot \sigma \cdot A_{apertura} \cdot (T_{placa}^2 + T_{cristal\ inf}^2)(T_{placa} + T_{cristal\ inf})}$$

Donde:

$\epsilon_{\text{cristal}}$ es la emisividad del cristal [-].

ϵ_{placa} es la emisividad de la placa absorbadora [-].

T_{placa} es la temperatura en la placa absorbadora [K].

$T_{\text{cristalinf}}$ es la temperatura en la parte inferior del cristal de la cubierta [K].

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, de valor $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

A_{apertura} es el área de apertura del captador (m^2).

- **Conducción en la cubierta.**

La resistencia de conducción en la lámina cristal que cubre el captador se calcula de forma similar a la resistencias de conducción anteriores

$$R_{\text{cristal}} = \frac{e_{\text{cristal}}}{k_{\text{cristal}} \cdot A_{\text{apertura}}}$$

Donde:

e_{cristal} es el espesor del cristal de la cubierta [m].

A_{apertura} es la superficie de apertura del captador [m^2].

k_{cristal} es la conductividad térmica del cristal [W/mK].

Por tanto la resistencia térmica de la cubierta es

$$R_{\text{cristal}} = 1,41 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}$$

- **Convección en la parte superior de la caja.**

La resistencia térmica de convección en la parte superior de los colectores se calcula como sigue:

$$R_{\text{convSUP}} = \frac{1}{h_{\text{convSUP}} \cdot A_{\text{apertura}}}$$

Donde:

h_{convSUP} es el coeficiente de convección del aire [$\text{W/m}^2\text{K}$].

A_{apertura} es la superficie de apertura del captador [m^2].

El proceso de convección, al igual que en el fondo de la caja, es forzado. El número de Reynolds (Re) característico del flujo es

$$Re_{convSUP} = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{aire} \cdot L_c}{\mu_{aire}}$$

Donde:

ρ_{aire} es la densidad del aire [kg/m³].

V_{aire} es la velocidad del aire [m/s].

μ_{aire} es la viscosidad dinámica del aire [Ns/m²].

L_c es la longitud característica del colector [m].

El flujo es longitudinal al captador, por lo que la correlación a aplicar para hallar el número de Nusselt (Nu) será

$$Nu_{SUP} = 0,105 \cdot Re_{convSUP}^{0,646} \cdot Pr_{aire}^{1/3}$$

Finalmente, el coeficiente de convección es

$$h_{convSUP} = \frac{Nu_{SUP} \cdot k_{aire}}{L_c}$$

A partir del cual se calcula la resistencia térmica correspondiente

- **Radiación en la cubierta de cristal.**

La resistencia de radiación del flujo de calor de la cubierta hacia el cielo se escribe

$$R_{radSUP} = \frac{1}{\epsilon_{cristal} \cdot \sigma \cdot A_{apertura} \cdot (T_{cristal}^2 + T_{cielo}^2)(T_{cristal} + T_{cielo})}$$

Donde:

$\epsilon_{cristal}$ es la emisividad del cristal [-].

$T_{cristal}$ es la temperatura en cubierta de cristal [K].

T_{cielo} es la temperatura de cielo [K].

σ es la constante de Stefan-Boltzman, de valor $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$A_{apertura}$ es el área de apertura del captador (m²).

A modo de resumen se recogen las distintas resistencias térmicas en la siguiente tabla, recogiendo el valor medio anual en aquellas resistencias cuyo valor depende de condiciones ambientales.

RESISTENCIA TÉRMICA	SÍMBOLO	VALOR
Convección en la caja (MEDIO)	$R_{convINF}$	$2,58 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Conducción en la caja (MEDIO)	R_{caja}	$1,67 \cdot 10^{-5} \text{ W/mK}$
Conducción en el aislante	$R_{aislante}$	$0,756 \text{ W/mK}$
Conducción en tubos	R_{tubos}	$2,65 \cdot 10^{-6} \text{ W/mK}$
Convección en fluido (MEDIO)	R_{fluido}	$1 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Conducción placa absorbedor	R_{abs}	$1,2 \cdot 10^{-2} \text{ W/mK}$
Radiación absorbedor-cubierta (MEDIO)	R_{radINT}	$1,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Convección absorbedor-cubierta (MEDIO)	$R_{convINT}$	$6,62 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Conducción cristal	$R_{cristal}$	$1,4 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$
Convección cristal-ambiente (MEDIO)	$R_{convSUP}$	$9,1 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Radiación cristal-cielo (MEDIO)	R_{radSUP}	$0,83 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Tabla 8.4 Resumen de las distintas resistencias térmicas.

4.2.2 Cálculo de las pérdidas en los captadores.

El calor total que llega a los captadores desde el sol se puede expresar de la forma

$$Q_{total} = I_t \cdot A_{apertura}$$

De esta energía, se producen las pérdidas comentadas anteriormente en el captador, de forma que puede suponerse las siguientes contribuciones:

$$Q_{total} = q_{opt} + q_{util} + q_{sup} + q_{inf}$$

Donde:

Q_{total} es el calor que llega a los captadores [W].

q_{util} es el calor aprovechado para calentar el fluido de trabajo [W].

q_{opt} son las pérdidas ópticas del captador [W].

q_{sup} son las pérdidas de calor por la parte superior del captador [W].

q_{inf} son las pérdidas de calor por la parte inferior del captador [W].

Las pérdidas ópticas vienen dadas por el rendimiento óptico del colector, y constituyen una medida del calor que llega a la placa absorbidora. Se calculan de la siguiente forma:

$$q_{opt} = (1 - \eta_0) \cdot I_t \cdot A_{apertura}$$

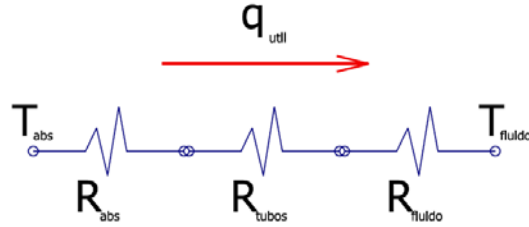
Donde:

η_0 es el rendimiento óptico del captador [-].

El resto de parámetros se definieron anteriormente.

El calor útil será el calor que, una vez alcanzada la placa absorbidora, pase a calentar el fluido caloportador. Utilizando las resistencias térmicas anteriormente calculadas se obtiene su valor mediante

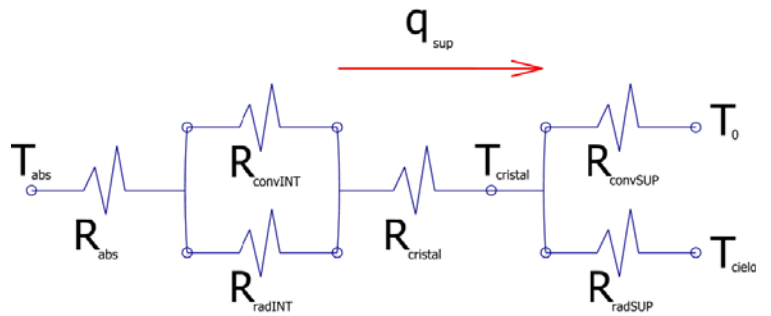
$$q_{util} = \frac{T_{abs} - T_{fluido}}{R_{abs} + R_{tubo} + R_{fluido}}$$



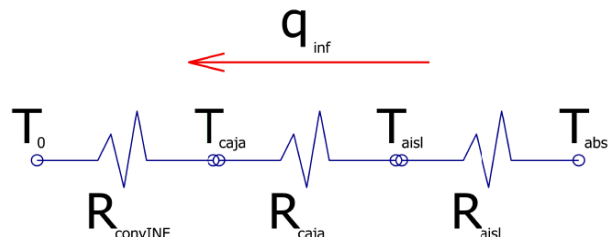
El resto de las pérdidas son de origen térmico, pérdidas de calor, y se producen tanto por la parte superior como por la parte inferior de los captadores. Se han despreciado las pérdidas laterales al ser estas superficies mucho menores que las áreas frontal y trasera.

Las pérdidas de calor por estas áreas se definen a continuación

$$q_{SUP} = \frac{T_{abs} - T_{cristal}}{\left(\frac{1}{R_{radINT}} + \frac{1}{R_{convINT}} \right)^{-1} + R_{cristal}}$$



$$q_{INF} = \frac{T_{abs} - T_0}{R_{aisl} + R_{caja} + R_{convINF}}$$



Para el cálculo numérico de estos flujos, dado que ya se conocen los valores de las resistencias térmicas, es necesario conocer las siguientes temperaturas:

$$T_{cielo} \quad T_0 \quad T_{cristal} \quad T_{caja} \quad T_{abs} \quad T_{fluido}$$

Algunas de estas temperaturas pueden calcularse a partir de correlaciones. Es el caso de las temperaturas de cielo, del cristal y de la caja, que se obtienen mediante

$$T_{cristal} = 0,037536 \cdot T_{amb}^{1,5} + 0,32 \cdot T_{amb}$$

$$T_{cielo} = 0,037536 \cdot T_{amb}^{1,5} - 2,34$$

$$T_{caja} = 1,021 \cdot T_{amb} - 1,762$$

La temperatura del agua se tomará como media de la temperatura en el interior del colector, esto es

$$T_{fluido} = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2}$$

Para la obtención de la temperatura del absorbedor, asumiremos como hipótesis recogida en [11] que la temperatura de la placa es ligeramente mayor que la temperatura media del fluido caloportador a su paso por el colector. Queda entonces definida como:

$$T_{abs} = \frac{T_{co} + T_{ci}}{2} + 1^\circ C$$

Una vez conocidas todas las temperaturas necesarias, así como las resistencias térmicas a través de cada elemento, podemos calcular las pérdidas de calor en los captadores. Se recogen en la siguiente tabla dichas pérdidas para cada mes del año:

MES	Q_{sup}	Q_{inf}	Q_{fluido}	$Q_{total} (W)$
<i>ENE</i>	136,09	23,50	40,66	200,26
<i>FEB</i>	143,14	31,94	41,37	216,45
<i>MAR</i>	166,59	39,80	41,58	247,97
<i>ABR</i>	153,15	43,76	41,71	238,62
<i>MAY</i>	183,01	40,92	41,78	265,71
<i>JUN</i>	156,59	42,91	41,85	241,34
<i>JUL</i>	161,70	55,28	42,05	259,04
<i>AGO</i>	168,36	66,76	42,19	277,30
<i>SEP</i>	175,54	51,30	41,92	268,76
<i>OCT</i>	168,31	41,88	41,71	251,91
<i>NOV</i>	173,50	30,52	41,44	245,45
<i>DIC</i>	152,37	24,20	41,02	217,58

Tabla 8.5 *Pérdidas en los captadores.*

8.3 Otras pérdidas de calor en la instalación.

Además de las pérdidas en los captadores, se producen diversas pérdidas energéticas en los distintos elementos de la instalación. Como pérdidas más cuantificables se tienen la pérdida de calor en las conducciones de fluido, tanto en el circuito primario como en el secundario, así como las pérdidas de calor que se producen en el tanque de almacenamiento.

8.3.1 Pérdidas de calor en conducciones.

Para el cálculo de las pérdidas en conducciones es necesario realizar un dimensionado previo de las tuberías que se utilizarán tanto en el circuito primario como en el secundario. Para ello, a partir del caudal en ambos circuitos se obtiene el diámetro interior.

$$D = j \cdot C^{0,35}$$

Donde:

D es el diámetro necesario [cm].

J es una constante que caracteriza la rugosidad de la tubería (2,2 para tuberías metálicas).

C es el caudal [m³/h]

De esta forma, para el caudal que circula por los colectores (0,11 m³/h), el diámetro necesario es:

$$D = 1,02cm = 10,2mm$$

Tomamos el valor normalizado inmediatamente superior, que en este caso se corresponde con un diámetro exterior de 15mm y uno interior de 13mm, siendo por tanto el espesor de la pared de 1mm.

Conocido el diámetro de las tuberías procedemos al cálculo de pérdidas de calor en las mismas. El método de cálculo de las pérdidas de calor en las tuberías de los circuitos primario y secundario coincide con el utilizado para el cálculo de las pérdidas en los conductos de los captadores. Se realizará por tanto un cálculo a partir de resistencias térmicas.

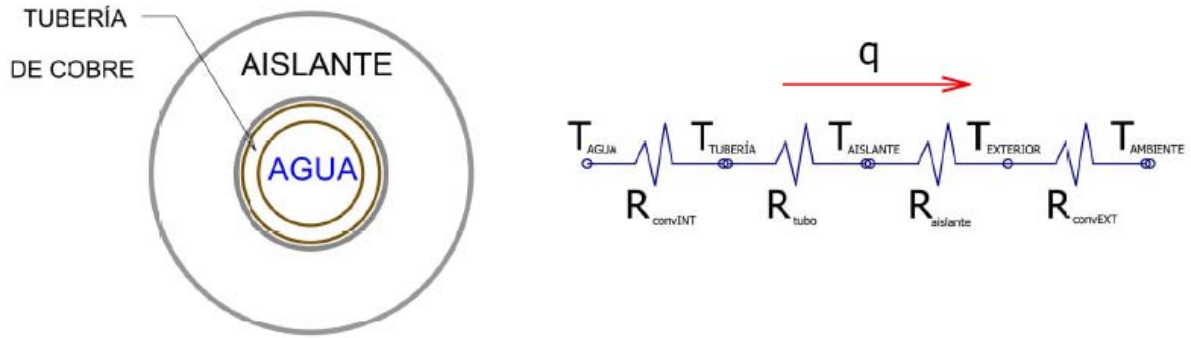


Figura 8.8 Resistencias térmicas en tuberías

El cálculo de las resistencias térmicas de conducción es el mismo que el realizado anteriormente. Únicamente diferirá en el tipo de aislante empleado y el fluido en el caso del circuito secundario (que ya no será propilenglicol, sino agua). Las características de conductividad y dimensiones de los distintos elementos se muestra en la tabla adjunta.

Circuito	Longitud	Material	$D_{interior}$	Espesor	k
PRIMARIO	4m	Cobre	13 mm	1mm	401 W/mK
SECUNDARIO	3m	Cobre	13 mm	1mm	401 W/mK

Tabla 8.6 Características de las tuberías.

En cuanto al aislante, se escoge la espuma elastomérica por proporcionar buenas propiedades de trabajo a altas temperaturas y una conductividad térmica reducida, de 0,034 W/mK. El espesor del aislante se obtiene a partir de los requerimientos de RITE para conducciones de fluidos calientes que circular por espacios interiores.

Así, para temperaturas de entre 40°C y 100°C es necesario un espesor de aislamiento de 25 mm.

Diámetro del tubo (mm)	Temperatura del fluido interior (°C)		
	40...60	> 60...100	> 100...180
$D \leq 35$	25	25	30
$35 < D \leq 60$	30	30	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40
$90 < D \leq 140$	30	40	50
$140 < D$	35	40	50

Tabla 8.7 *Espesor del aislamiento en tuberías interiores*

Una vez caracterizadas las tuberías pueden calcularse las resistencias térmicas. La resistencia térmica de conducción es, tanto para el aislante como para la propia tubería

$$R_{tubo} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{tubo} \cdot L_{tubo}}$$

$$R_{aislante} = \frac{\ln\left(\frac{D_{aisl ext}}{D_{aisl int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{aislante} \cdot L_{tubo}}$$

En cuanto a las resistencias térmicas de convección, supondremos que los conductos de ambos circuitos son están constituidos por idéntica tubería, además de poseer el mismo caudal. Procedemos entonces a calcular primeramente el número de Reynolds, para calcular con él en el Nusselt característico del flujo mediante la correlación

$$Nu_{fluido} = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,4}$$

Conocido el Nusselt se calcula el coeficiente de convección en el tubo,

$$h_{conv} = \frac{Nu_{fluido} \cdot k_{fluido}}{D_{int}}$$

Para posteriormente calcular la resistencia térmica correspondiente

$$R_{fluido} = \frac{1}{h_{int} \cdot \pi \cdot D_{int} \cdot L_{tubo}}$$

En cuanto a la resistencia de convección exterior, dado el emplazamiento de los equipos en la planta abuhardillada de la vivienda, la mayor parte de las tuberías de ambos circuitos discurren por el interior de la vivienda.

Por tanto, puede asumirse la convección en la superficie de los mismos como una convección no forzada. La correlación usada para obtener el número de Nusselt en esta configuración es la que corresponde a un cilindro horizontal,

$$Nu = \left[0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2$$

El número de Rayleigh asociado a esta correlación (debe ser menor de 10^{12}) se calcula como sigue:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{suptubo} - T_0) \cdot D_{ext}^3}{\nu_{aire} \cdot \alpha_{aire}}$$

El calor disipado, de acuerdo con el esquema de la figura viene dado por

$$Q_{prim} = Q_{sec} = \frac{T_{fluido} - T_0}{R_{fluido} + R_{tubo} + R_{aislante} + R_{conv}}$$

8.3.2 Pérdidas de calor en el tanque.

El tanque de acumulación de ACS es susceptible de sufrir pérdidas de calor al igual que el resto de conducciones. Un esquema del mismo se muestra en la figura siguiente.

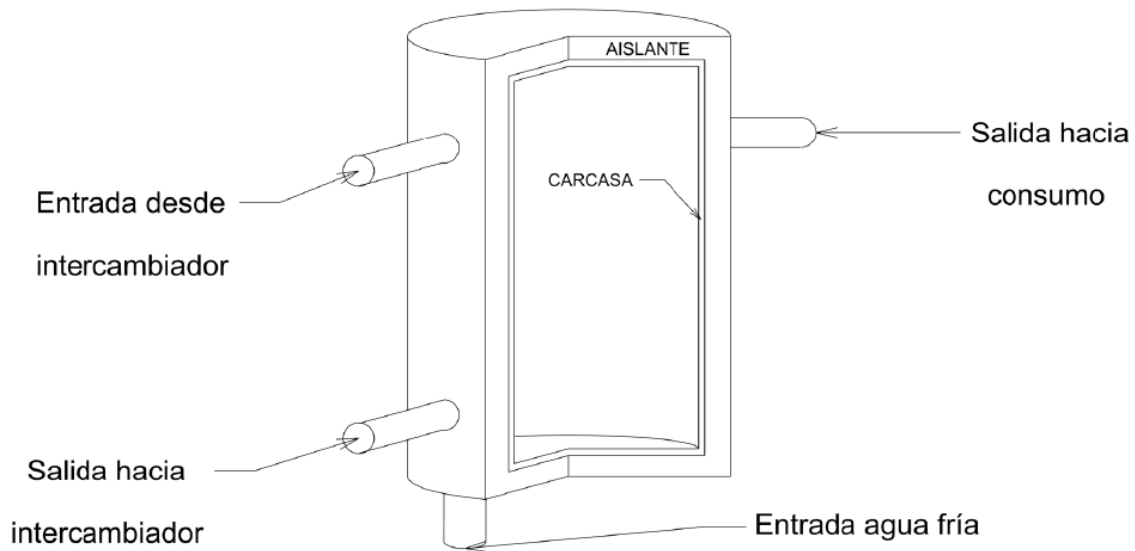


Figura 8.9 Esquema del tanque de ACS.

El procedimiento de cálculo de pérdidas de calor en el tanque se hace de nuevo mediante resistencias térmicas. En este caso, se elimina la resistencia térmica de convección interior, asumiendo una temperatura interior constante y un movimiento nulo del fluido interior. Estas hipótesis no son reales pero son asumibles para facilitar los cálculos del flujo de calor. El esquema correspondiente de las resistencias térmicas es el que sigue:

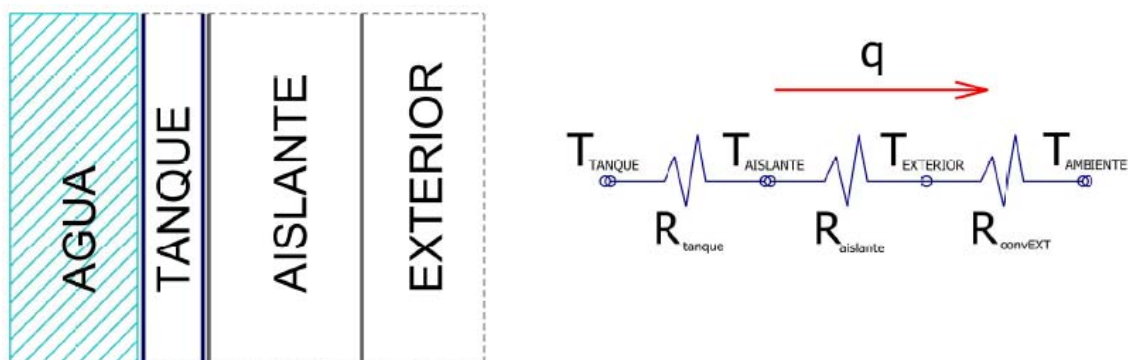


Figura 8.10 Resistencias térmicas para el tanque de ACS.

Al igual que los conductos del circuito primario y secundario, el tanque se encuentra en el interior de la vivienda. Como hipótesis, se supone la temperatura ambiental igual a la exterior de la vivienda más un 15%.

Las propiedades físicas del tanque se recogen en la siguiente tabla.

ELEMENTO	Material	Longitud	D _{interior}	Espesor	k
CARCASA	Acero Vitrificado	1,21 m	0,51 m	6 mm	14,9 W/mK
AISLANTE	Espuma Elastomérica	1,21	0,52	50 mm	0,034 W/mK

Tabla 8.8 Características del tanque.

Las resistencias de conducción en el tanque son

$$R_{\tan que} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{acero} \cdot L_{\tan que}}$$

$$R_{aisl \tan que} = \frac{\ln\left(\frac{D_{aisl ext}}{D_{aisl int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{aislante} \cdot L_{\tan que}}$$

Para la resistencia de convección no forzada, dado el tamaño del tanque lo asimilamos a una placa plana. De esta forma, la correlación del Nusselt a aplicar será similar a la utilizada para los tubos de los circuitos primario y secundario,

$$Nu = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{16} \right]^{9/27}} \right]^{2/5}$$

El calor total disipado para cada mes, en cada elemento y en el total de la instalación se muestra a continuación.

MES	Q _{captador} (W)	Q _{primario} (W)	Q _{secundario} (W)	Q _{tanque} (W)	Q _{total} (W)
ENE	200,26	6,32	2,87	26,26	235,71
FEB	216,45	8,48	3,95	36,41	265,30
MAR	247,97	10,60	4,87	44,13	307,58
ABR	238,62	11,75	5,29	47,54	303,21
MAY	265,71	10,76	4,75	41,88	323,10
JUN	241,34	11,32	4,91	42,36	299,94
JUL	259,04	15,17	6,89	61,65	342,75
AGO	277,30	18,33	8,80	81,75	386,18
SEP	268,76	13,67	6,27	55,77	344,47
OCT	251,91	10,98	5,03	45,14	313,06
NOV	245,45	7,86	3,48	30,86	287,66
DIC	217,58	6,52	2,94	26,83	253,88

Tabla 8.9 Pérdidas en el sistema ACS.

8.4 Cálculo de la superficie de colectores con pérdidas reales.

El balance de energía propuesto anteriormente, teniendo en cuenta las pérdidas calculadas, se ve modificado con respecto al planteado para la instalación ideal. El nuevo sistema recoge las siguientes ecuaciones, que ahora incluyen las pérdidas de calor en los distintos componentes de la instalación.

Balance energético en los colectores,

$$\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = I_t \cdot A_c \cdot \eta_o - Q_{cap}$$

Balance energético en el intercambiador,

$$\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) - Q_{prim} = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) - Q_{sec}$$

Balance energético en el tanque,

$$\dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) = \dot{m}_{cons} \cdot c_{pcons} \cdot (T_{cons} - T_{red})$$

Una vez resuelto, podemos comparar la nueva fracción solar con la obtenida mediante el balance ideal (tomando como máximo $f=1$).

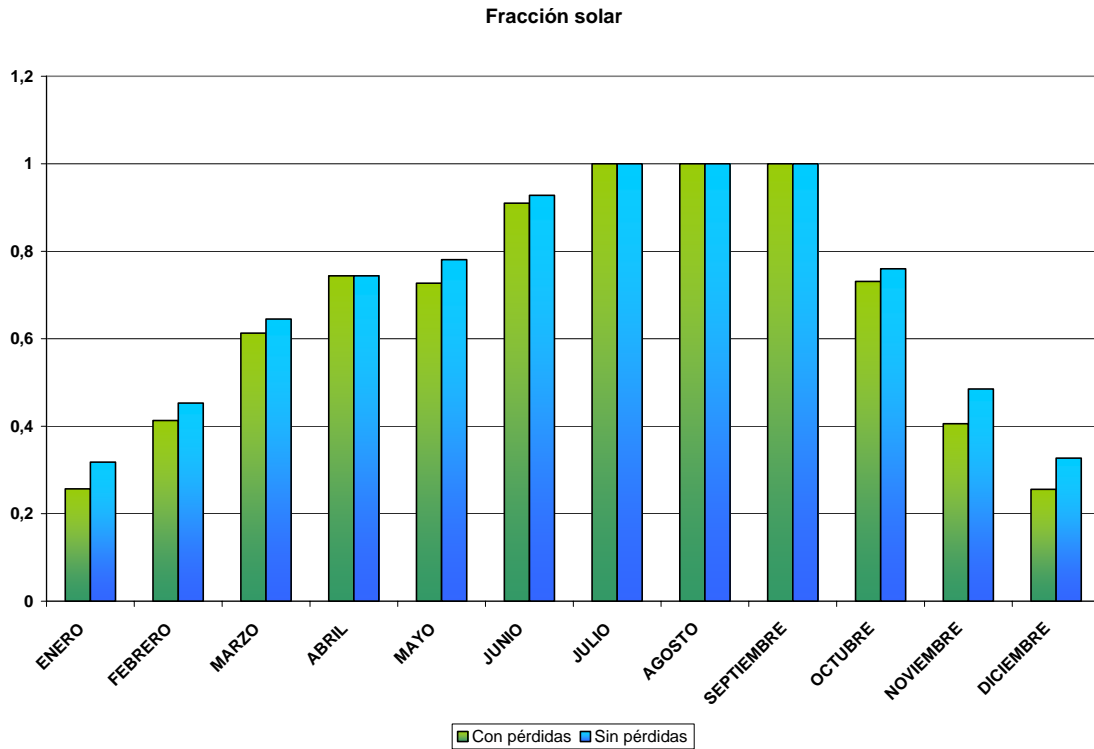


Figura 8.10 *Influencia de las pérdidas en la fracción solar.*

Se comprueba que las pérdidas afectan al rendimiento de la instalación, sobre todo durante los meses de menor radiación, donde el ratio pérdidas/potencia recibida es menor. De esta forma, la fracción solar calculada es del 67.15%, inferior a la fracción solar ideal calculada a partir de la curva del fabricante (70.35%), e inferior a la exigida por el CTE.

Por lo tanto, debemos disponer un segundo captador para cubrir la demanda de ACS de la vivienda.

8.5 Disposición de los captadores

Como comprobamos durante el dimensionado de la superficie de captadores, la utilización de un solo captador no proporciona la energía suficiente para cubrir la demanda de ACS de la vivienda (Tabla 8.10). Por tanto, se deberá instalar un segundo captador solar, cuyo uso se estudia a continuación. Los datos de fracción solar recogidos se corrigen cuando se encuentren por encima del 100%, llegando como máximo a 1 dado que el exceso de energía que presentan no se utilizará.

UN CAPTADOR							
MES	T _{co} (K)	T _{ci} (K)	T _{ico} (K)	T _{ici} (K)	T _{cons} (K)	T _t (K)	f
ENE	295,12	292,66	293,85	291,61	293,21	291,72	0,257
FEB	303,75	300,41	302,02	298,98	301,14	299,08	0,413
MAR	314,37	309,71	311,96	307,71	310,73	307,87	0,613
ABR	321,26	315,66	318,36	313,26	316,9	313,49	0,744
MAY	320,39	315,28	317,75	313,09	316,41	313,29	0,727
JUN	329,16	323,03	325,99	320,4	324,39	320,68	0,91
JUL	345,11	337,73	341,29	334,56	339,33	334,76	1
AGO	353,78	346,34	349,93	343,14	347,89	343,14	1
SEP	335,77	328,93	332,23	325,99	330,43	326,23	1
OCT	320,2	315,27	317,65	313,15	316,34	313,29	0,731
NOV	303,84	300,34	302,03	298,83	301,12	299,01	0,406
DIC	295,14	292,6	293,82	291,52	293,17	291,65	0,256
Media							0,67

Tabla 8.10 Temperaturas obtenidas con un solo captador.

Dos captadores

Tras realizar la simulación para un área igual al de dos captadores (4.42m²), cuyos datos se reflejan en la tabla 8.11 , podemos extraer las siguientes conclusiones:

- En este caso, la fracción solar obtenida cumple sobradamente con el mínimo marcado por el CTE (88,05%).
- Se obtiene un exceso de energía que duplica la demanda y que en una instalación como la nuestra constituye un desperdicio energético importante, dado que la fracción solar en los meses de julio y agosto supera el 200%.

- Se alcanzan muy altas temperaturas en el circuito primario, de hasta 142°C. Estas temperaturas superan el punto de ebullición de la mayoría de fluidos caloportadores existentes en el mercado para uso doméstico, suponiendo además una alta subida de presión en los circuitos que puede provocar daños en los componentes.

DOS CAPTADORES

MES	T _{co} (K)	T _{ci} (K)	T _{ico} (K)	T _{ici} (K)	T _{cons} (K)	T _t (K)	f
ENE	308,14	303,21	305,59	301,11	304,36	301,51	0,494
FEB	323,81	317,13	320,35	314,27	318,66	314,7	0,794
MAR	343,64	334,32	338,81	330,32	336,45	330,92	1
ABR	355,27	344,24	349,56	339,51	346,77	340,26	1
MAY	353,73	343,51	348,44	339,12	345,85	339,79	1
JUN	370,19	357,93	363,85	352,67	360,74	353,49	1
JUL	399,82	385,06	392,18	378,72	388,38	379,51	1
AGO	415,97	401,08	408,26	394,68	404,35	395,21	1
SEP	383,68	369,95	376,56	364,09	373,06	364,89	1
OCT	354,07	344,19	348,96	339,96	346,43	340,53	1
NOV	323,81	316,81	320,19	313,8	318,43	314,34	0,786
DIC	308,173	303,11	305,55	300,93	304,29	301,36	0,492
Media							0,88

Tabla 8.11 Temperaturas obtenidas con dos captadores.

Dos captadores combinados

La solución adoptada será por tanto una solución intermedia, utilizando según convenga uno o dos captadores solares. De esta forma, se utilizarán dos captadores durante los meses de menor radiación (ENE, FEB, MAR, ABR, MAY, OCT, NOV, DIC) y un solo captador en los meses de mayor radiación (JUN, JUL, AGO, SEP). Se realiza esta división de forma que el excedente máximo utilizando dos captadores no supere con el que se obtiene con un solo captador, y además se cumplan las condiciones con respecto al acumulador que se exponen en el apartado correspondiente al mismo.

La fracción solar obtenida en este caso (81%) es, obviamente, menor que utilizando dos captadores, pero también lo son las temperaturas en el sistema, llegando a alcanzar de forma máxima los 85°C y permitiendo el uso del fluido caloportador con el que se ha realizado el dimensionado previo.

COMBINACIÓN DE CAPTADORES

MES	T _{co} (K)	T _{ci} (K)	T _{ico} (K)	T _{ici} (K)	T _{cons} (K)	T _t (K)	f
ENE	308,14	303,21	305,59	301,11	304,36	301,51	0,494
FEB	323,81	317,13	320,35	314,27	318,66	314,7	0,794
MAR	343,64	334,32	338,81	330,32	336,45	330,92	1
ABR	355,27	344,24	349,56	339,51	346,77	340,26	1
MAY	353,73	343,51	348,44	339,12	345,85	339,79	1
JUN	329,16	323,03	325,99	320,4	324,39	320,68	0,91
JUL	345,11	337,73	341,29	334,56	339,33	334,76	1
AGO	353,78	346,34	349,93	343,14	347,89	343,14	1
SEP	335,77	328,93	332,23	325,99	330,43	326,23	1
OCT	320,2	315,27	317,65	313,15	316,34	313,29	0,731
NOV	323,81	316,81	320,19	313,8	318,43	314,34	0,786
DIC	308,17	303,11	305,55	300,93	304,29	301,36	0,492
Media							0,85

Tabla 8.12 Temperaturas obtenidas con uno o dos captadores combinados.

La figura 8.11 muestra la comparativa entre la fracción solar obtenida mensualmente a partir de las tres configuraciones (1 captador, 2 captadores y una combinación de ambas).

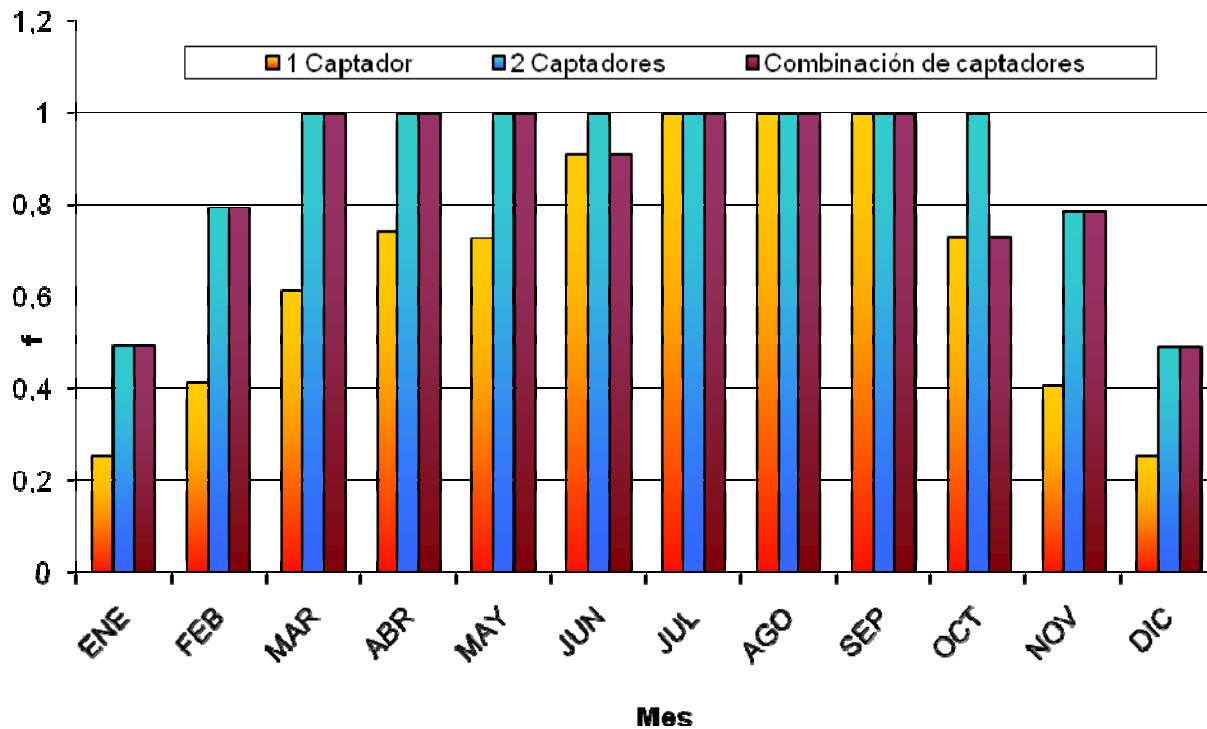


Figura 8.11 Fracción solar de las distintas configuraciones.

El cambio de configuración de la instalación (de 1 a 2 captadores y viceversa) se realizará mediante una operación de mantenimiento que podría consistir, bien en el tapado de uno de los colectores o bien en su aislamiento mediante llaves de paso y posterior purgado.

Se opta finalmente por el tapado del colector, al ser la operación de mantenimiento más sencilla y barata de las propuestas.

Finalmente, los captadores se conectarán en serie.

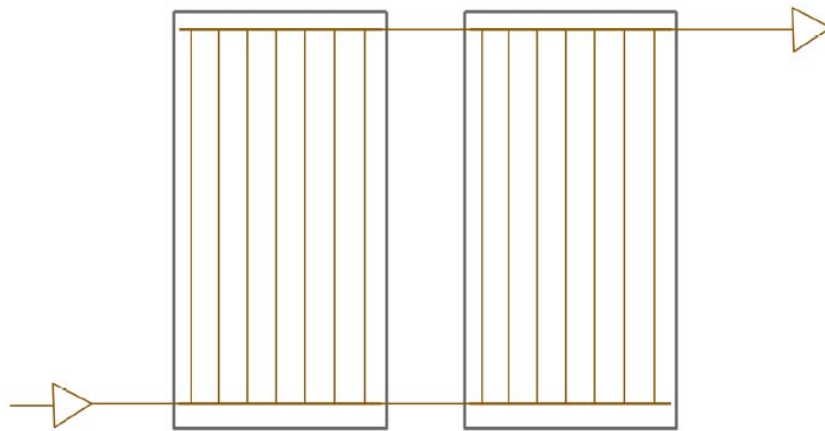


Figura 8.12 *Disposición de los captadores solares.*

8.6 Intercambiador de calor.

En este apartado calculamos el intercambiador de calor que permite el intercambio de calor entre los circuitos primario y secundario. En nuestro caso, el intercambiador es externo al acumulador.

Se utilizará un intercambiador de placas paralelas, sin contacto entre fluidos. A partir de los parámetros del intercambiador calculamos el número de placas necesarias para transferir la potencia necesaria.

El intercambiador escogido es de la firma ALFA LAVAL, modelo BASE-3, cuyas principales características son:

Altura de placa (L) 357 mm.

Ancho de placa (W) 180 mm.

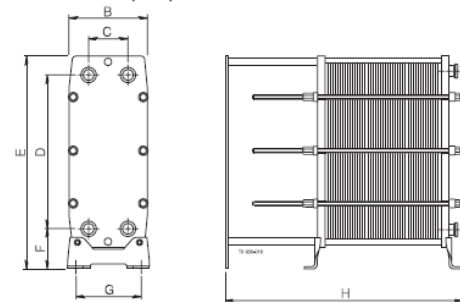
Área de intercambio unitaria (a) 0,064 m²

Distancia entre placas (b) 2,5 mm.

Espesor de placa (ε) 0,5 mm.

Coficiente de conductividad (k) 16 W/mK.

Dimensions (mm)



- 1) Adjustable feet ± 30 mm on BASE-3, BASE-6 and BASE-10.
2) Adjustable feet ± 50 mm on BASE-11

Dimensions	BASE-3	BASE-6	BASE-10	BASE-11
B	180	304	446	473
C	60	140	223	218
D	357	640	719	1338
E	545	909	1053	2087
F	141	181	214	430
G	176	290	430	590
H	250-510	575-1925	700-2200	1100-3000

La potencia que se necesita transferir de un fluido a otro es la potencia recibida por los captadores. En esta ecuación, para las temperaturas T_{co} y T_{ci} ya se ha tenido en cuenta las pérdidas de calor en los conductos del circuito primario.

A través de la expresión

$$Q_{IC} = \dot{m}_1 \cdot c_{p_1} \cdot (T_{co} - T_{ci})$$

Evaluaremos la potencia que es necesario intercambiar para cada mes del año, para posteriormente utilizar el valor medio en el diseño del intercambiador.

T_{co} (K)	T_{ci} (K)	T_{ico} (K)	T_{ici} (K)
333,38	326,14	329,63	323,03

Tabla 8.13 *Temperaturas medias de los fluidos en el intercambiador.*

La potencia del necesaria para el intercambiador es de 930 W

Sin embargo, el CTE obliga a que la potencia de intercambio transferida cumpla la siguiente condición.

$$Q_{IC\min} \geq 500 \cdot A$$

Por tanto, la potencia utilizada para el cálculo del intercambiador tomando un área media del período anual (3,7 m²) será de 1850W.

Para caracterizar el intercambiador, como comentamos anteriormente, debemos hallar el número de placas que tenemos que montar. Éste vendrá dado por el área total de intercambio necesaria, dado que ya conocemos el área de intercambio de cada placa. La ecuación siguiente relaciona todas estas variables.

$$Q_{IC\min} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

Donde:

$Q_{IC\min}$ es el calor transferido en el intercambiador [W].

U es el coeficiente global de transferencia de calor [W/m²K].

A es el área de transferencia de calor [m²].

ΔT_{lm} es la temperatura a logarítmica media [K].

La temperatura logarítmica media se calcula mediante

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{co} - T_{ico}) - (T_{ci} - T_{ici})}{\ln\left(\frac{T_{co} - T_{ico}}{T_{ci} - T_{ici}}\right)}$$

$$\Delta T_{lm} = 3,42K$$

A partir de este punto, se hace necesario el cálculo de las propiedades de los dos fluidos que participan en el intercambio, con el fin de calcular sus coeficientes de convección y, con ellos, el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador.

Para el cálculo del número de placas del intercambiador realizamos un cálculo iterativo mediante el programa MathCAD. Supondremos un número inicial de placas de 25 e iniciaremos el cálculo hasta que la solución converja. El procedimiento es el que sigue.

Cálculo de la velocidad del fluido en cada canal. Conocido el caudal que circula por cada circuito, hallamos el área transversal del canal:

$$A_{canal} = b \cdot W$$

El caudal que circulará por cada canal viene dado entonces por

$$\dot{m}_{canal} = \frac{\dot{m}_{circuito}}{(N-1) \cdot 2}$$

Donde N es el número de placas del intercambiador. Partiremos para la primera iteración de 25 placas. La velocidad en el canal es, entonces

$$V_{canal} = \frac{\dot{m}_{canal}}{\rho \cdot A_{canal}}$$

Una vez hallada la velocidad, se calculan los números adimensionales de Reynolds y Nusselt

$$Re = \frac{V_{canal} \cdot L_c \cdot \rho}{\mu}$$

$$Nu = 0,4 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,4}$$

Y con ellos los coeficientes de convección en cada fluido

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L_c}$$

Para finalmente obtener el coeficiente global de transferencia de calor, U

$$U = \frac{1}{h_{agua}} + \frac{1}{h_{prop}} + \frac{\varepsilon}{k}$$

Una vez obtenido este coeficiente, sustituimos en la expresión que nos da la potencia intercambiada, obteniendo el área total de intercambio y, dividiendo entre el área unitario de cada placa, el número de placas

$$A = \frac{Q_{IC \min}}{U \cdot \Delta T_{lm}} \qquad A = N \cdot a$$

Al llegar al final de las iteraciones, el número de placas N obtenido es igual al número de placas estimado. En este caso el intercambiador tendrá un área total de 0,334 m²

Y por lo tanto, el intercambiador escogido deberá montar un número de placas N=6.

8.7 Bombas de circulación.

La circulación del fluido de los circuitos primario y secundario se realiza mediante una bomba de impulsión en cada uno de ellos. Realizamos aquí el cálculo de la potencia requerida por ambas para un correcto funcionamiento.

En el circuito primario, se procede a la circulación de los fluidos cuando la diferencia de temperatura entre la sonda conectada a los colectores y la sonda conectada al acumulador es mayor que el diferencial elegido (tomado como 3°C).

Para el cálculo de la potencia necesaria para la bomba de circulación es necesario un cálculo de las pérdidas de presión que se producen en cada uno de los circuitos, teniendo en cuenta todos sus elementos (tuberías, colectores a intercambiador de calor).

8.7.1 Pérdidas de carga por fricción en tuberías

$$\Delta P_{tub} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \left(f(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}) \cdot \frac{L + \sum K}{D} \right)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido [kg/m³]

f es el coeficiente de fricción.

L es longitud del tubo [m].

V es la velocidad del fluido por el interior del conducto [m/s].

D es el diámetro del conducto [m]

K es el coeficiente de pérdidas de cada elemento.

La velocidad del fluido en ambos circuitos es conocida del estudio sobre la superficie de captadores, siendo 0,351m/s en el circuito primario y 0,361 m/s en el secundario, cumpliendo con los requerimientos del DTIE que establece una velocidad mínima de 0,3 m/s.

El número de Reynolds para esta configuración es

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido [kg/m³]

V es la velocidad del fluido por el interior del conducto [m/s].

D es el diámetro del conducto [m]

μ es la viscosidad dinámica del fluido [kg/m s].

Obteniéndose unos valores para este parámetro de 2270 y 5530 para los circuitos primario y secundario respectivamente.

El otro parámetro necesario para el cálculo del coeficiente de fricción, que se calcula según

$$\frac{\varepsilon_r}{D}$$

Donde:

ε_r es la rugosidad del tubo (para el cobre 0,0015) [m].

D es el diametro interior del tubo [m].

Y que ofrece el mismo valor para los dos circuitos, 0,00014.

Conocidos estos valores entramos en el diagrama de Moody para obtener el valor del coeficiente de fricción, como se muestra en la página siguiente.

Además de las pérdidas por fricción en tuberías, se producen pérdidas de carga en los distintos elementos de cada uno de los circuitos, caracterizados por un coeficiente de pérdidas K . Esta información se recoge en la siguiente tabla.

Elemento	K	Circuito Primario	Circuito Secundario
<i>Codo 90°</i>	1	4	2
<i>Reductor</i>	0,3	2	1
<i>Ensanchamiento</i>	0,4	2	1
<i>Válvula de esfera</i>	14	2	0

Tabla 8.14 Pérdida de carga en elementos del circuito

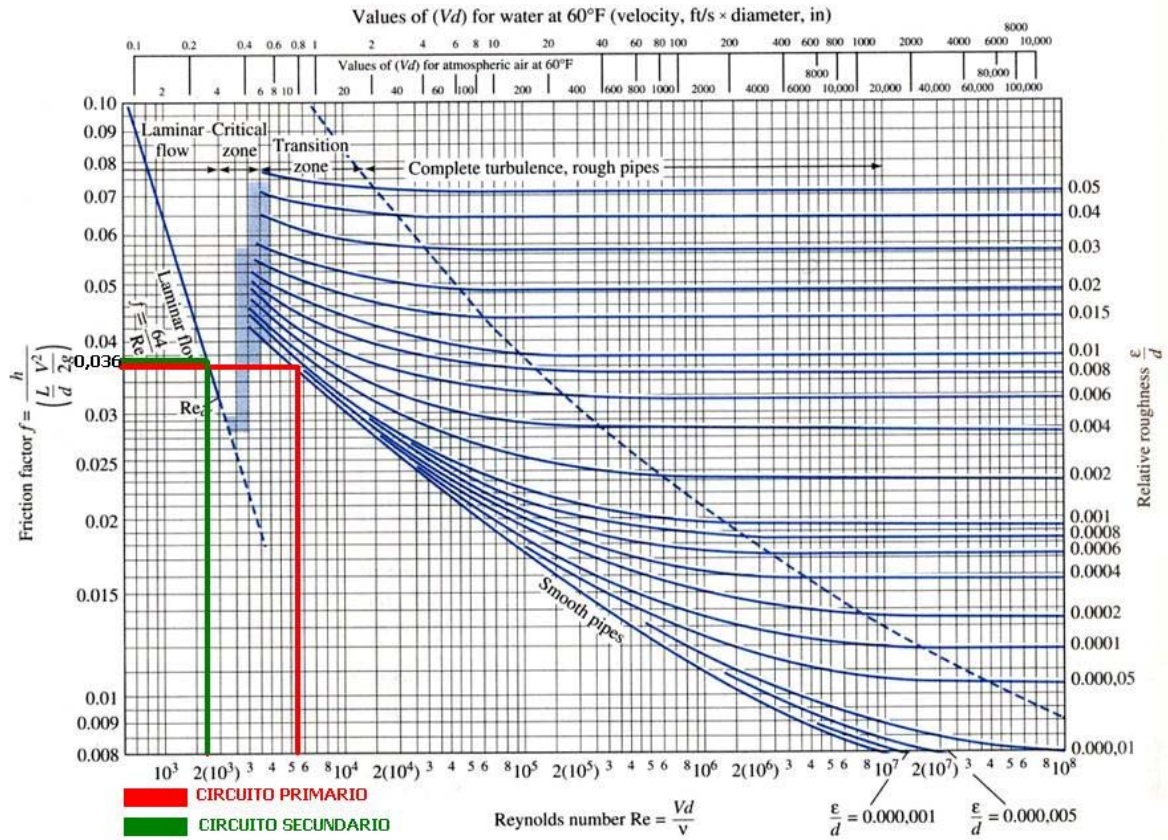


Figura 8.13 Diagrama de Moody

Las pérdidas por fricción en tuberías son, como se expuso anteriormente

$$\Delta P_{tub} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \left(f(Re, \frac{\epsilon}{D}) \cdot \frac{L + \sum K}{D} \right)$$

Dando un resultado para cada circuito de

$$\Delta P_{tubprim} = 34450 Pa \quad \Delta P_{tubsec} = 5985 Pa$$

8.7.2 Pérdidas de presión en los captadores

La curva de pérdida de carga para el captador escogido cumple la siguiente ecuación

$$\Delta P_{col} = 0,0056 \cdot Q(l/h) + 2,727 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2(l/h)$$

Para el caudal utilizado en esta instalación, que coincide con el recomendado por el fabricante (110 l/h), la pérdida de carga obtenida es

$$\Delta P_{col} = 95 Pa$$

Al tener dos captadores en serie, la pérdida total de carga será el doble de la calculada, es decir, 190 Pa.

8.7.3 Pérdidas de presión en el intercambiador de calor

La pérdida de presión del circuito en el intercambiador de calor de placas se calcula a partir de la expresión

$$\Delta P_{IC} = 4 \cdot f \cdot \frac{L}{l_c} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

Donde todos los parámetros han sido expuestos anteriormente y el factor de fricción f se calcula en este caso como

$$f = C \cdot Re^M$$

Siendo C y M constantes que dependen del valor del número de Reynolds, y que toman los siguientes valores:

Re	C	M
Re < 10	17	-1
10 < Re < 101	6,29	-0,57
101 < Re < 855	1,141	-0,2
Re > 855	0,581	-0,1

Tabla 8.15 *Parámetros del factor de fricción*

El número de Reynolds de los dos fluidos a su paso por el intercambiador de calor fueron calculados en el apartado correspondiente al mismo, y el factor de fricción correspondiente a cada fluido es de para el fluido circulante por el primario y para el secundario.

La pérdida de carga en el intercambiador de calor será entonces de 262 Pa para el primario y 207 Pa para el secundario.

La potencia total de la bomba, teniendo en cuenta todos los elementos de cada circuito es

	PRIMARIO	SECUNDARIO
<i>ΔP Tubería</i>	34450 Pa	5985 Pa
<i>ΔP Colectores</i>	190 Pa	-
<i>ΔP Intercambiador</i>	262 Pa	207 Pa
<i>ΔP TOTAL</i>	<i>34902 Pa</i>	<i>6192 Pa</i>

Tabla 8.16 *Resumen de las pérdidas de presión en la instalación de ACS*

La potencia requerida para cada bomba es el resultado de multiplicar las pérdidas de carga de cada circuito por el caudal del mismo (en m^3/s). Así se necesitará

$$P_{bprim} = 2,07W$$

$$P_{bsec} = 0,39W$$

Se eligen dos bombas iguales, GRUNDFOS ALPHA2 diseñadas específicamente para el bombeo en instalaciones de ACS, con cuerpo de acero inoxidable. La potencia nominal de estas bombas es de 5W.

8.8 Acumulador de ACS

El CTE establece que la relación existente entre el volumen del acumulador y el área de captadores debe cumplir la expresión

$$50 < \frac{V}{A_{\text{captadores}}} < 180$$

En este proyecto, el área de captadores varía durante los distintos períodos del año, pasando de 2,21 m² en los meses de mayor radiación a 4,42 m² en los que la radiación es menor. Calculamos entonces un área promedio para el acumulador ponderando cada área con los meses que se usa, obteniendo un valor de 3,68 m². El volumen mínimo del acumulador es entonces de 184 litros.

Escogemos un acumulador de 200 litros de acero vitrificado y aislado térmicamente mediante espuma elastomérica de 50 mm de espesor.

Con el fin y la periodicidad que contemple la legislación vigente a la prevención de la aparición de la bacteria Legionella, se prevé la posibilidad de conexionado puntual, mediante maniobra manual específica, entre el sistema auxiliar (calentador de gas) y el acumulador solar; de modo que se pueda calentar este último con el sistema de apoyo hasta la temperatura de seguridad (70°C). Se instalarán termómetros monitorizados mediante un panel centralizado a la entrada y la salida del acumulador.

8.9 Disipador.

Como quedó expuesto anteriormente, el CTE en su apartado HE4 establece que:

- No se podrá superar el 110% de la demanda de ACS en ningún mes del año.
- No se podrá superar el 100% de la demanda de ACS en tres meses consecutivos.

Sin embargo, en nuestra instalación se supera durante varios meses del año el 100% de la demanda, siendo además este exceso superior al 10% en casi todos los casos.

El CTE ofrece varias alternativas para la evacuación de esta energía sobrante, y en este caso optamos por la disipación en forma de calor. Para ello, instalamos en el colector solar un disipador térmico por gravedad. Este sistema carece de elementos eléctricos y disipa el exceso de calor generado por la baja demanda de ACS.

Este tipo de disipadores se componen de una válvula termostática, tarada a 90°C que comunica el captador con unas baterías de tubos de cobre aleteados. Cuando el fluido llega a la temperatura de consigna, se abre la válvula y recircula por termosifón a través de la batería, manteniendo la temperatura aproximada de 90°C en el colector. Se instala en la parte posterior del colector.



Figura 8.14 *Disipador de calor por gravedad.*

. La energía que será necesario disipar para cada mes puede calcularse a partir de la fracción solar mensual, dado que la fracción solar se define como el cociente entre la energía recibida y la energía demandada. Así, para cada mes se tiene

MES	f	Q _{necesario} (MJ)	Q _{recibido} (MJ)	Q _{exceso} (MJ)
ENE	0,494	974,74	481,52	-493,22
FEB	0,794	861,68	684,18	-177,51
MAR	1,184	933,27	1104,99	171,72
ABR	1,423	883,09	1256,64	373,55
MAY	1,411	891,79	1258,31	366,52
JUN	0,91	842,95	767,08	-75,87
JUL	1,273	850,31	1082,44	232,13
AGO	1,476	860,68	1270,36	409,68
SEP	1,053	863,02	908,76	45,74
OCT	0,731	912,53	667,06	-245,47
NOV	0,786	913,20	717,77	-195,42
DIC	0,492	974,74	479,57	-495,17

Tabla 8.17 Excedente energético mensual de la instalación de ACS

En la tabla se aprecia que el mes que se necesita disipar más calor es el mes de Agosto, con un total de 409,68 MJ. Procedemos a calcular la potencia que debe extraer del sistema el disipador:

$$409,68MJ = 113,8kWh$$

$$113,8 \frac{kWh}{mes} \cdot \frac{1dia}{9,5h_{utiles}} \cdot \frac{1mes}{31dias} = 386,4W$$

Por tanto, se precisa de un disipador que pueda evacuar una potencia superior a 386,4 W. Se escoge el modelo apropiado de los existentes en el mercado.

8.10 Vaso de expansión.

El vaso de expansión será el elemento encargado de atenuar los cambios de presión que se produzcan en el circuito primario debido a los cambios de temperatura del fluido caloportador.

Consiste en un depósito (cerrado en este caso) que se encuentra dividido en dos cámaras separadas por una membrana elástica. La cámara inferior se encuentra ocupada por un gas (aire o gas inerte) a la presión de trabajo del circuito. Cuando la presión en el circuito aumenta, se permite el acceso del fluido al vaso de expansión, desplazando la membrana y disminuyendo el volumen de fluido en el circuito y por lo tanto la presión en el mismo. Cuando la temperatura vuelve a la normalidad la membrana presiona el fluido y lo devuelve al circuito.

De esta forma, se evitan operaciones de mantenimiento para desalojar el fluido sobrante en condiciones de altas temperaturas, a la vez que se evitan pérdidas por evaporación del fluido.

La conexión del vaso de expansión dentro del circuito se hará de tal forma que no se encuentre ninguna válvula ni accesorio en el ramal donde se coloca. Es por esto que se situará en el tramo del circuito previo a la aspiración de la bomba.

El cálculo del vaso de expansión se realiza comparando el volumen mínimo y máximo del fluido que pueden alcanzarse en el circuito primario. Se toma para el volumen mínimo las temperaturas ambientales del mes más frío y para el volumen máximo la temperatura máxima alcanzada por el colector. Supondremos en este caso una temperatura de 100°C, ya que el disipador se encuentra tarado a 90°C.

	$T_{MÁX}$	$T_{MÍN}$
$T (K)$	281.15	373.15
$\rho (kg/m^3)$	1,02	
$v (m^3/kg)$	9,9 E ⁻⁴	1,037 E ⁻³

$$V_{TOTAL} = V_{tuberías} + V_{captadores}$$

$$V_{TOTAL} = L_{tubos} \cdot \frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} + 2 \cdot V_{captador}$$

$$V_{TOTAL} = 7m \cdot \frac{\pi \cdot (0,0104)^2}{4} + 2 \cdot (0,015) = 3,59 \cdot 10^{-3} m^3$$

Con lo que obtenemos el volumen ocupado por el fluido del circuito primario.
La masa de fluido a cada temperatura es

$$m_{fluido} = V_{TOTAL} \cdot \rho_{fluido} = 3,59 \cdot 10^{-3} m^3 \cdot 1020 \frac{kg}{m^3} = 3,66 kg$$

Finalmente, el volumen ocupado por el fluido en cada caso se calcula multiplicando la masa por el volumen específico para la temperatura dada

$$V_{fluido} = m \cdot v(T)$$

El volumen mínimo del vaso de expansión debe ser

$$V_{exp} = n \cdot \Delta V_{fluido} = 1,5 \cdot 3,66 kg \cdot (1,034 \cdot 10^{-3} - 9,9 \cdot 10^{-4})$$

$$V_{exp} = 0,24 m^3$$

8.11 Sistema de apoyo.

Como pudimos ver al calcular la fracción solar de la instalación, en algunos meses la energía captada no es suficiente para calentar el agua hasta la temperatura requerida.

El calor necesario para elevar la temperatura desde la temperatura a la que se encuentra el agua del tanque hasta la temperatura de consumo (55°C) debe ser aportado por un sistema de apoyo. Debido a la normativa existente, el aporte de apoyo Se ha escogido para esta función un calentador de agua a gas.

Cuando el agua procedente del acumulador supera la temperatura de consumo del sistema, el agua pasa directamente hasta el punto de suministro. Si, en cambio, el agua no alcanza la temperatura de consumo a la salida del acumulador, se hace pasar a través del calentador. Así, el calentador aporta el calor diferencial hasta alcanzar la temperatura deseada.

Por tanto, para el cálculo de la potencia del calentador, comparamos la temperatura media mensual del tanque con la temperatura de consumo establecida.

La potencia necesaria se calcula mediante

$$Q_{apoyo} = \dot{m}_{suministro} \cdot C_p \cdot (T_{cons} - T_t)$$

Donde:

$\dot{m}_{suministro}$ es el caudal másico que es extraído por el grifo.

C_p es el calor específico del agua.

T_{cons} es la temperatura de consumo.

T_t es la temperatura del agua en el tanque.

El caudal de consumo del grifo se ha estimado en 8 litros/minuto, que equivalen a un caudal másico de 0,133 kg/s. La temperatura de consumo es de 328,15K.

MES	T_t (K)	Q_{apoyo} (kW)
ENE	301,51	12,03
FEB	314,7	4,70
MAR	330,92	0
ABR	340,26	0
MAY	339,79	0
JUN	320,68	1,37
JUL	334,76	0
AGO	343,14	0
SEP	326,23	0
OCT	313,29	5,48
NOV	314,34	4,90
DIC	301,36	12,11

Tabla 8.17 *Calor suministrado por el calentador.*

Los valores negativos se corresponden con un exceso de temperatura sobre la temperatura de consumo. Estos meses, el flujo saliente del acumulador se mezclará con agua fría hasta rebajar su temperatura a un punto próximo al de consumo

Para el aporte de calor los meses de baja radiación se adquiere entonces un calentador a gas doméstico, de una potencia de hasta 19 kW con un caudal de 2 a 11 litros y un encendido por batería al superar la presión de la línea los 0,1 bares.

CAPÍTULO III

Instalación de Bombeo

9. Características de la instalación.

10. Demanda total de agua.

11. Dimensionado de la instalación.

9. Características de la instalación de bombeo.

La finca dispone de un pozo excavado, de 1.30 metros de diámetro y 8 metros de profundidad que suministra agua potable, apta para el consumo personal. La situación del pozo puede encontrarse en los planos de distribución del ANEXO I. Ésta instalación suministrará agua tanto para ACS como para consumo humano.

Se pretende sustituir la bomba existente en el pozo por una de características más adecuadas al sistema de extracción alimentado por energía solar fotovoltaica. Además es necesario el almacenamiento, aunque no sean necesarias grandes reservas dado que el recurso hídrico no es limitante. Esto permitirá que en éstos períodos de baja producción energética la totalidad de la misma se destine a consumo eléctrico de la vivienda.

Inicialmente, se procede a un estudio de caracterización del acuífero donde además de características químicas y bacteriológicas del agua (que reflejan su potabilidad), se toman datos de importancia para el proyecto de abastecimiento, como son los siguientes parámetros:

- **Nivel estático** del agua o nivel freático (H_{ST}). Distancia vertical entre el nivel del suelo y el nivel de agua antes de la prueba de bombeo.
- **Nivel dinámico** del agua (H_D). Distancia vertical entre el nivel del suelo y el nivel final del agua después de la prueba de bombeo.
- **Caudal de prueba** (Q_T). Caudal de agua extraído durante la prueba de bombeo.

Para la obtención de éstos parámetros se plantea una prueba de bombeo. Éste tipo de pruebas son frecuentes para realizar la evaluación de acuíferos, utilizando el estímulo del bombeo y observando su respuesta.

La forma más común de realizar una prueba de bombeo es la extracción mediante una bomba del agua a una tasa constante, mientras se miden los niveles de agua en el mismo pozo o pozos de observación pertenecientes al mismo acuífero. Se realiza generalmente en los meses de verano, cuando el nivel freático es menor, asegurando así una mayor recuperación el resto del año.

Los parámetros de la prueba de bombeo, así como un esquema de la instalación, se muestran en el diagrama adjunto.

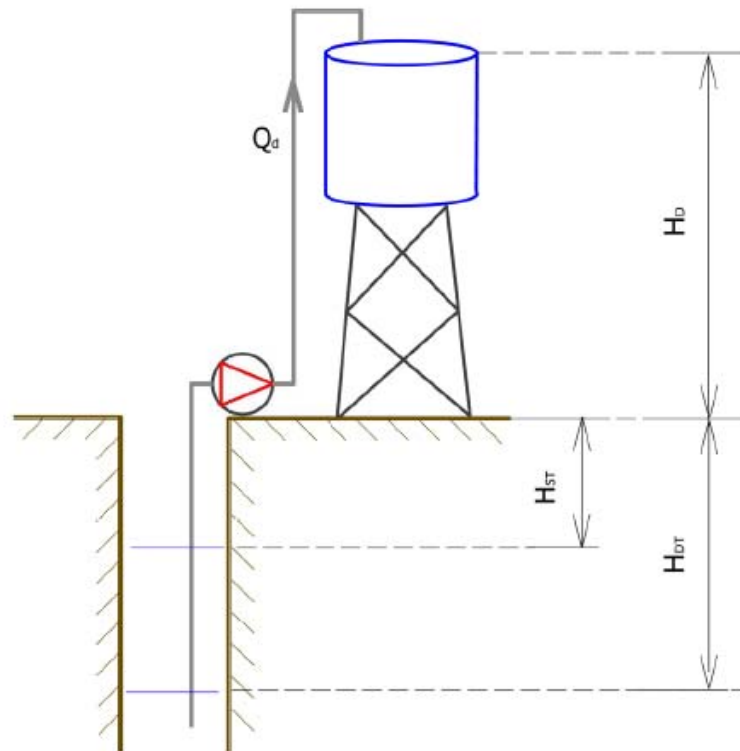


Figura 9.1 Esquema de la instalación de bombeo.

Siendo:

H_D la altura del depósito, 6 m.

H_{ST} el nivel estático del agua, 9 m.

H_D el nivel dinámico del agua, 10,5 m.

Q_T es el caudal de prueba, 2 m³/h.

Q_d es el caudal diario extraído, 2 m³/h.

10. Demanda total de agua

El gasto de ACS se ha calculado en apartados previos. El cálculo del gasto de agua para consumo personal, se realizará mediante estimación.

Según estudios de la OMS, el consumo de agua en algunos países desarrollados alcanza los 300 litros/persona/día. Dicha entidad recomienda un consumo de 80 litros al día para necesidades vitales e higiene personal. La media española se encuentra en 190 litros/persona/día. Adoptando una postura intermedia, se trabajará con un consumo medio por persona y día de 120 litros de agua.

Nuestra vivienda ha sido diseñada para una ocupación ordinaria de 4 personas, por lo que el consumo diario será de:

$$120 \text{ litros/persona} \times 4 \text{ personas} = 480 \text{ litros de agua al día}$$

Además, habrá que tener en cuenta que el depósito de ACS debe llenarse diariamente.

$$\text{Gasto agua total} = \text{Gasto ACS} + \text{Gasto consumo}$$

$$\text{Gasto total agua} = 200 \text{ litros (depósito)} + 480 \text{ litros} = 680 \text{ litros diarios.}$$

11. Dimensionado de la instalación

Conocida la demanda total de agua y las características del pozo podemos dimensionar los componentes del sistema de bombeo. Éste sistema consta de tres elementos a calcular:

- Tanque de almacenamiento.
- Conducciones.
- Bomba de impulsión.

11.1 Tanque de almacenamiento.

Conocido el consumo diario total de agua se procede al dimensionado del tanque. Como se anticipó en la introducción de ésta instalación, se dimensionará el tanque de tal manera que permita el abastecimiento hidráulico aún en días de baja o nula radiación solar. De ésta manera, el total de energía eléctrica en estos períodos se empleará íntegramente en la instalación de la vivienda.

Tomando un factor de protección de 2, se garantiza el suministro de agua durante dos días consecutivos con mínima radiación solar. Así pues la capacidad del tanque seleccionado será de un mínimo de 1360 litros. En el mercado se encuentran distintos modelos que cumplen esta condición, escogiendo finalmente un tanque de 1500 l. de capacidad. El tanque está homologado para contener agua potable sin alterar sus características (tanto composición como propiedades organolépticas).

Se instala elevado, de manera que una vez extraída el agua del pozo sólo sea necesaria una pequeña cantidad de energía para el presurizado de la línea. Para ello se colocará el tanque sobre una estructura especialmente diseñada a tal fin y asentada sobre una fundación de hormigón.

11.2 Conducciones.

El agua extraída del pozo será conducida desde el mismo hasta el depósito mediante una línea de tubería. Dado que no existen exigencias de caudal se tomará un caudal preferentemente bajo para minimizar los costes tanto de la línea de tubería como de la bomba de impulsión.

Se decide por tanto que un caudal óptimo para nuestro propósito será de 2 m³/h.

Conocido el caudal se procede al cálculo del diámetro de tubería que llegará al depósito desde la bomba. Este diámetro vendrá dado por

$$D = j \cdot C^{0,35}$$

Donde:

D es el diámetro necesario [cm].

J es una constante que caracteriza la rugosidad de la tubería.

C es el caudal [m³/h]

La tubería empleada será galvanizada en su tramo, ya que reúne las mejores características para la conducción de agua potable. Para ella, el coeficiente j será igual a 2,2 . Así, el diámetro mínimo de la tubería es de 2.8 cm.

El diámetro calculado es el diámetro mínimo para el caudal establecido. Ahora bien, diámetros estrechos aumentan las pérdidas por fricción, por lo que la tubería que conecta el pozo con el depósito será una tubería galvanizada de 5 cm de diámetro normalizado (2") para reducir las pérdidas.

$$D = 5 \text{ cm}$$

La tubería irá enterrada desde su salida del pozo hasta llegar a la estructura que soporta el depósito para continuar verticalmente, y guiado a través de la misma mediante tornillos en U, hasta desembocar en la parte superior del depósito.

11.3 Bomba de impulsión.

La potencia necesaria para impulsar el agua desde el pozo hasta el tanque de almacenamiento se calcula mediante la expresión

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eq}$$

Donde:

ρ es la densidad del agua (1000kg/m³).

g es la constante gravitatoria (9,81 m/s²).

Q es el caudal [m³/h].

H_{eq} es la altura equivalente de bombeo

La altura equivalente de bombeo es

$$H_{eq} = H_d + H_{st} + H_{perdidas} + Q_{AP} \left(\frac{H_{dt} - H_{st}}{Q_T} \right)$$

Siendo:

H_d es la altura del depósito desde el suelo [m].

H_{st} es la altura del nivel estático del agua [m].

$H_{perdidas}$ es la altura de las pérdidas por fricción [m].

Q_T es el caudal de prueba, extraído durante la prueba de bombeo [m³/h].

Q_{AP} es el caudal aparente, $\left(Q_{AP} = \frac{Q_T}{24} \right)$

La altura de fricción equivalente es el resultado de la caída de presión debida al rozamiento del líquido con el interior de la tubería. Estas pérdidas de carga dependen de la longitud de la tubería, de su diámetro y del coeficiente de fricción f , el cual depende a su vez de la rugosidad de la superficie interior del tubo y de las características de la corriente (régimen laminar o turbulento).

Además, se dan pérdidas por rozamiento en los distintos elementos del circuito como codos, elementos en T, salidas y entradas de depósitos, filtros...

Así,

$$H_{perdidas} = H_{friccion} + H_{localizadas}$$

$$H_{perdidas} = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{d \cdot 2g} + \frac{V^2}{2g} \cdot \sum_i K$$

Donde:

f es el coeficiente de fricción.

L es longitud del tubo [m].

V es la velocidad del fluido por el interior del conducto [m/s].

d es el diámetro del conducto[m].

K es el coeficiente de pérdidas de cada elemento.

Para llegar a conocer el valor de **f** se necesita conocer la rugosidad relativa la tubería, dependiente del material y del diámetro de la misma. Para una tubería de diámetro de 50 mm de acero galvanizado, se tiene

$$\frac{\varepsilon_r}{D} = \frac{0,15mm}{50mm} = 0.003$$

Conocido este dato sólo es necesario hallar el número de Reynolds característico de esta conducción, que servirá para caracterizar el flujo de agua en el interior de la tubería.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,283 \cdot (m/s) \cdot 0.05m}{1,307 \cdot 10^{-6} m^2/s} = 10833$$

De manera que el flujo de agua que recorre la tubería será turbulento.

Conocidos ya todos los parámetros necesarios para la obtención del factor de fricción, se obtiene el mismo en el diagrama de Moody correspondiente a la figura siguiente.

La intersección en dicho diagrama de la línea de rugosidad constante $\frac{\varepsilon}{D}$ y la vertical desde $Re = 5416$ nos lleva a un valor de

$$f = 0,035$$

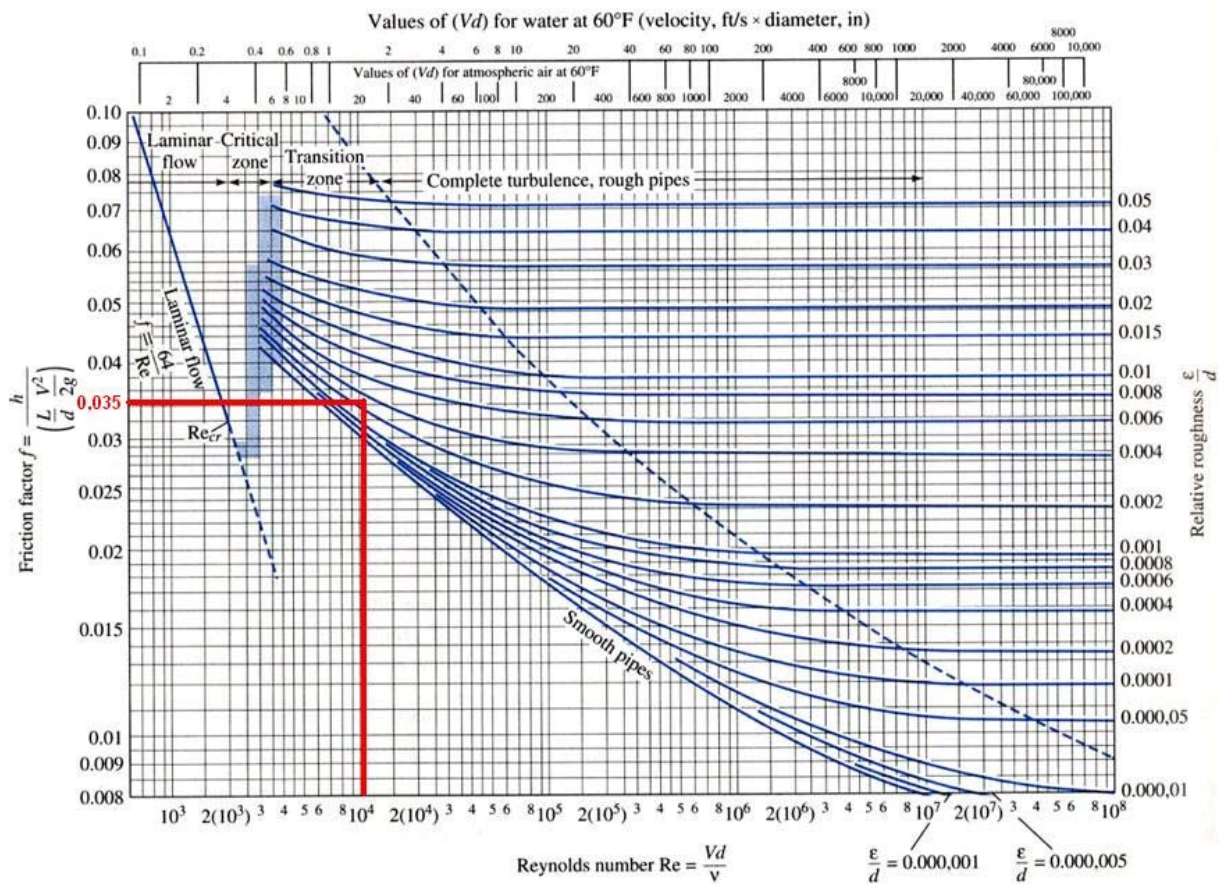


FIGURA 9.2 *Diagrama de Moody*

La pérdida de carga en la tubería considerando únicamente la fricción en el tubo será entonces:

$$H_{fricción} = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{d \cdot 2g} = 0,035 \cdot \frac{20m \cdot (0,283m/s)^2}{0,05 \cdot 2 \cdot 9,81m/s^2} = 0,058m$$

Puede comprobarse que las pérdidas de carga por fricción son mínimas frente al resto de alturas.

En el caso de las pérdidas localizadas,

$$H_{localizadas} = \frac{V^2}{2g} \cdot \sum_i K_i$$

Los distintos valores de K se corresponden con el tipo de elemento por el que circula el fluido.

En éste caso se trata únicamente de 3 codos de 90° suavizados y roscados, por lo que K= 0.41 más una válvula de esfera para aislar la bomba del circuito, K=6,9.

De esta manera

$$H_{localizadas} = \frac{V^2}{2g} \cdot \sum_i K_i = \frac{(0,283m/s)^2}{2 \cdot 9,81m/s^2} \cdot (3 \cdot 0,41 + 6,9) = 0,033m$$

Al igual que las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería, las pérdidas localizadas en los distintos elementos de la línea son mínimas.

Una vez realizado el cálculo de pérdidas puede calcularse la altura equivalente de bombeo

$$\begin{aligned} H_{eq} &= H_d + H_{st} + H_{perdidas} + Q_{AP} \left(\frac{H_{dt} - H_{st}}{Q_T} \right) = \\ &= 6m + 9m + 0,091m + 0,084 \left(\frac{10,5 - 9}{2} \right) m = 15,16m \end{aligned}$$

Y con ella la potencia requerida por la bomba (asumiendo un rendimiento genérico de la bomba de $\eta_{MB}=0.45$).

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eq}}{\eta_{MB}} = \frac{1000(kg/m^3) \cdot 9,81(m/s^2) \cdot 0,000555(m^3/s) \cdot 15,16m}{0,45}$$

$$P = 183,4W$$

Escogemos de entre las opciones comerciales disponibles la bomba GRUNDFOS SQFlex 2,5-2 de 240W.

Esta potencia demandada por la bomba será suministrada también mediante energía solar fotovoltaica. Para ello caben varias opciones:

- Alimentación con instalación propia.
- Alimentación con instalación compartida.

En el primer caso, se trata de una (o varias) células fotovoltaicas independientes del sistema que alimenta la vivienda. En el segundo, se tomaría la bomba de extracción de agua como una carga más de la vivienda.

Para realizar una instalación más compacta, que facilite tanto el montaje como el mantenimiento, se opta por incluir la bomba dentro de las cargas totales. De este modo su tratamiento será similar al de cualquier electrodoméstico.

La siguiente cuestión es la elección del tipo de bomba necesaria. Teniendo en cuenta los parámetros que conocemos, potencia y caudal, se elige una bomba no sumergida de dos etapas y de alimentación en corriente alterna.

Para adaptar la motobomba al aporte de energía solar, se programará su funcionamiento en horas donde el consumo de otros elementos sea menor

- **Sistema lógico de funcionamiento**

El llenado del depósito se regulará mediante un sencillo circuito lógico que incluirá un programador temporal, , y dos interruptores de nivel, en la parte superior y a 1/3 de la altura del depósito.

De esta forma:

- Si el depósito no se encuentra lleno y llega la hora de conexión, la bomba actuará hasta llenar el depósito.
- Si llegase la hora de conexión y el depósito de encontrase lleno la bomba no entraría en funcionamiento.
- Si no estuviésemos en hora de funcionamiento programada pero se detectase un bajo nivel en el depósito, se dará un estado de “emergencia” en el que la bomba arrancará y funcionará hasta llenar el depósito.

CAPÍTULO IV

Instalación solar fotovoltaica

12. Principio de funcionamiento.

13. Descripción de la instalación.

14. Demanda energética.

15. Evaluación del recurso solar.

16. Dimensionado de la instalación.

12. Principio de funcionamiento.

Los sistemas fotovoltaicos se basan en la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Este efecto consiste en la excitación de un material semiconductor, el silicio, por la incidencia de la radiación solar, provocando el movimiento de los electrones del material por el interior del mismo, movimiento que es transformado en corriente eléctrica continua cuando se cierra el circuito.

Cada célula solar está formada por tres elementos:

- Un semiconductor tipo n (con exceso de carga negativa)
- Una unión p-n
- Un semiconductor de tipo p (con exceso de carga positiva)

El fundamento de la corriente eléctrica interna está en la existencia de dos zonas de conductividades diferentes (cada uno de los semiconductores) dentro de una misma célula fotovoltaica. Estas zonas diferenciadas se consiguen añadiendo impurezas en el silicio (acción denominada dopaje). La zona p se consigue mediante impurezas de boro (positiva por tener un electrón de enlace menos que el silicio) y la zona n se obtiene a partir de impurezas de fósforo (negativo, por tener un electrón de enlace más que el silicio).

Al incidir la radiación solar (fotones) y unirse ambos semiconductores (p y n), se genera una fuerza electromotriz por el movimiento de los electrones (cargas negativas) en exceso de la zona n hacia los huecos (cargas positivas) de la zona p.

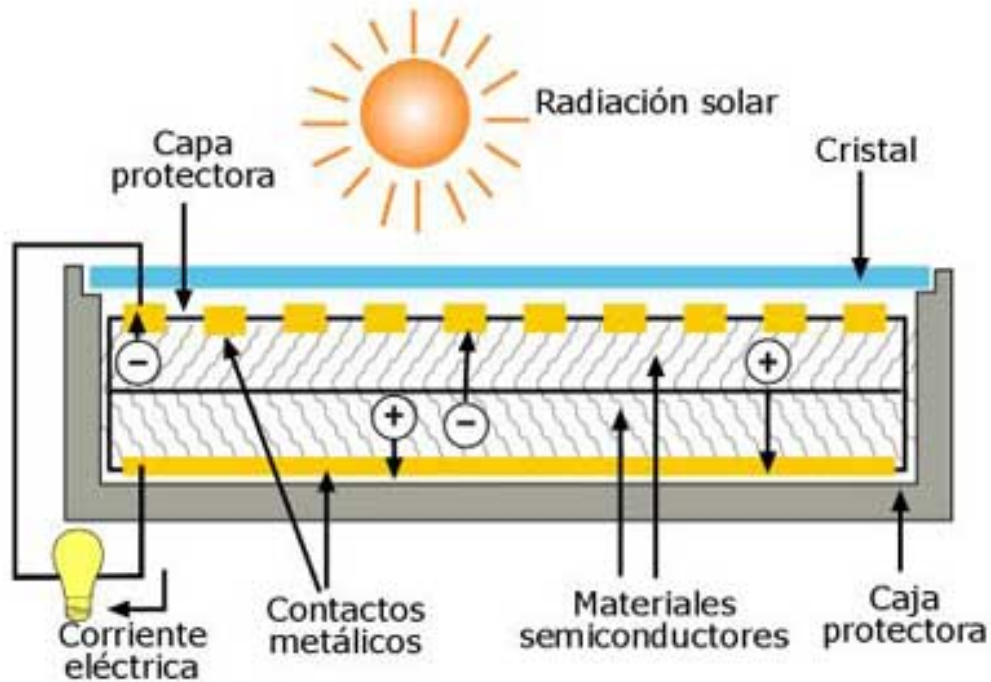


Figura 12.1 *Esquema de una célula solar fotovoltaica*

Para conseguir el cierre del circuito y permitir el movimiento exterior de los electrones (que constituyen la corriente eléctrica) se disponen sendas mallas metálicas en la parte frontal de las células (en forma de rejilla para permitir el paso de la radiación solar), que será unidas mediante conductores eléctricos para extraer la corriente eléctrica generada por la célula.

Cada célula, de forma individual, produce unos 0,4 V. Para conseguir tensiones superiores, las células se unen entre sí en serie y en paralelo, de forma que se conecte el dorso de una de ellas con la parte frontal de la adyacente, conformando módulos fotovoltaicos de 12V o 24V.

13. Descripción de la instalación.

El sistema de captación solar fotovoltaica que instalaremos en la vivienda puede representarse esquemáticamente como se muestra en la figura adjunta. En ella se muestran los elementos indispensables para el correcto funcionamiento de la instalación.

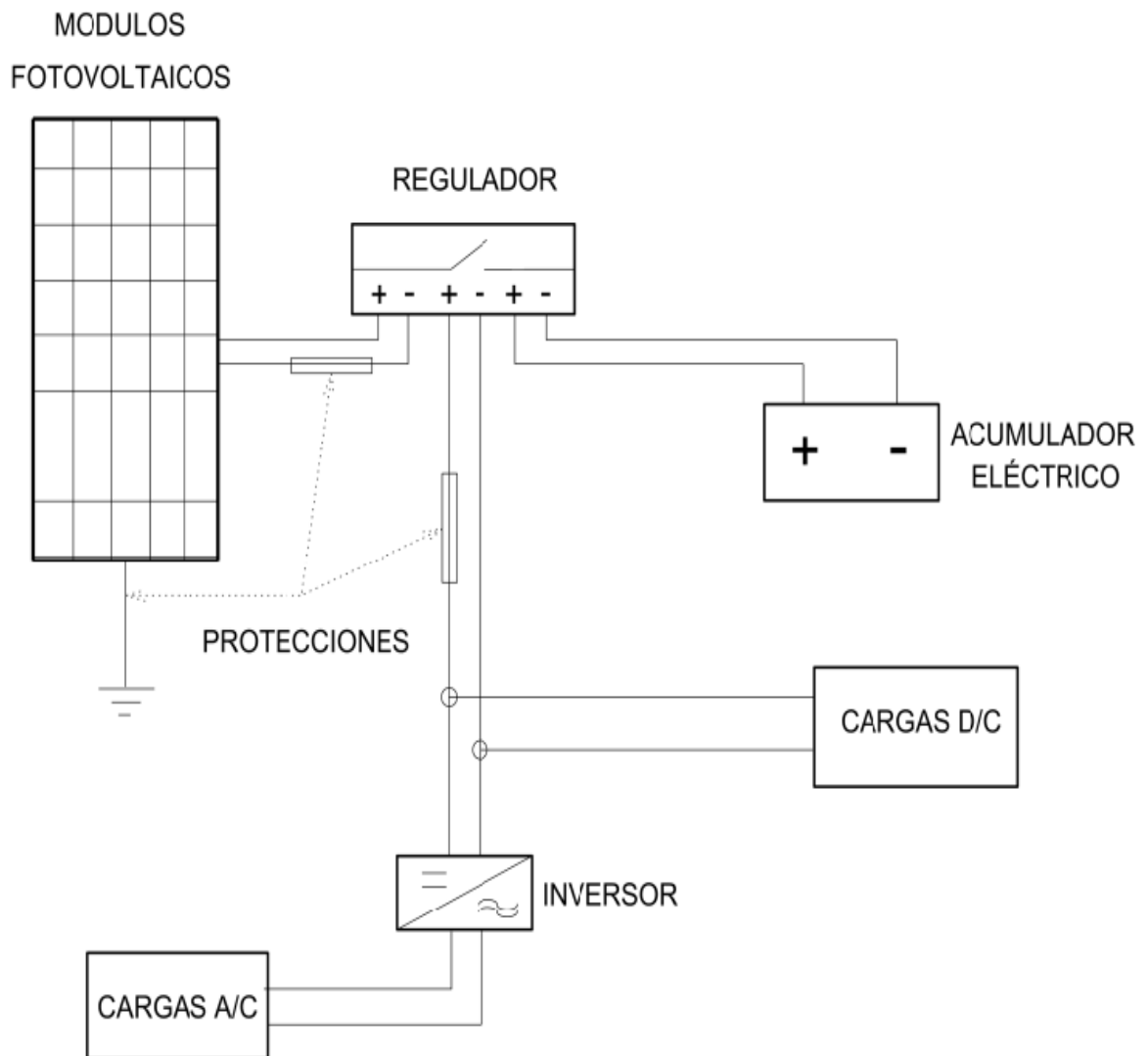


Figura 13.1 *Esquema del sistema fotovoltaico.*

- **Módulos fotovoltaicos.**

Es el elemento fundamental en cualquier sistema solar fotovoltaico. Captan la energía solar incidente, generando una corriente eléctrica. Su caracterización se hace a través de la gráfica Tensión-Intensidad. Los valores reflejados en esta gráfica se obtienen sometiendo al panel a unas condiciones estándar de medida (CEM) definidas por los siguientes valores:

Radiación: $1.000W/m^2$, Temperatura: $25^{\circ}C$, incidencia normal (0°) y espectro radiante AM 1.5.

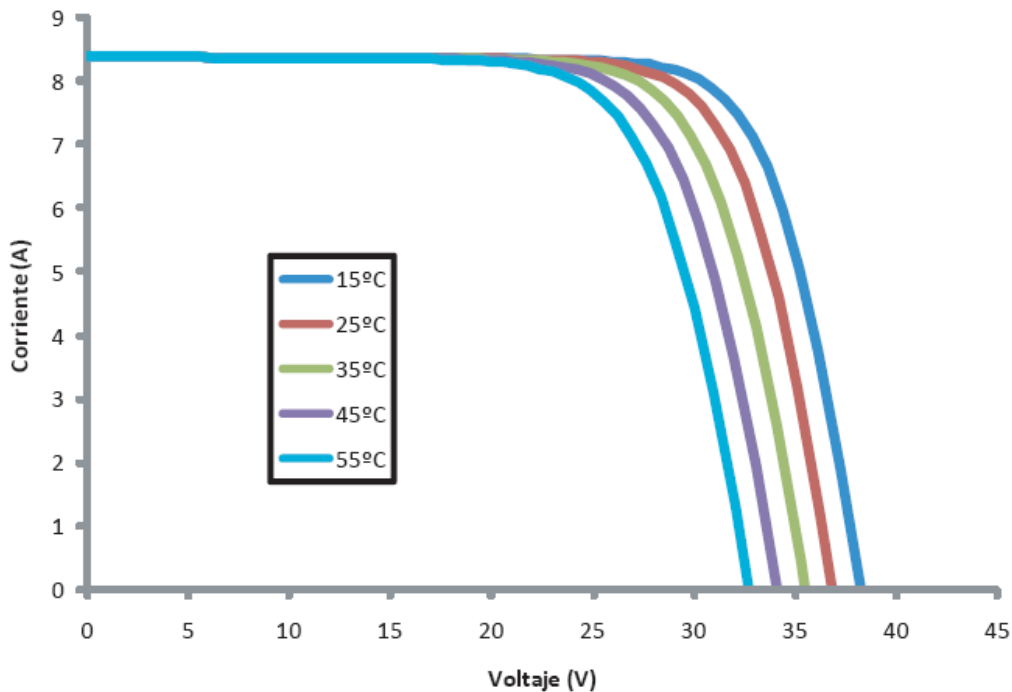


Figura 13.2 *Curva tensión-intensidad e influencia de la temperatura en la misma*

No obstante, el comportamiento eléctrico un módulo varía con las condiciones ambientales.

Aumentos de la temperatura ambiente producen disminuciones de la tensión a circuito abierto y, por tanto, disminuciones de la potencia (Figura 13.2). Aumentos de la irradiancia solar producirán aumentos de la intensidad de cortocircuito y, por tanto, aumentos de potencia.

La potencia del panel puede llegar a disminuir alrededor de un 0.5% por cada grado por encima de 25°C que aumente la temperatura del módulo.

Los parámetros eléctricos que caracterizan el comportamiento de un módulo fotovoltaico son los que se definen a continuación:

- *Intensidad de cortocircuito (I_{sc}):* Es la máxima intensidad que se puede obtener de un panel. Se calcula midiendo la corriente entre los bornes del panel cuando se provoca un cortocircuito ($V=0$). La intensidad de cortocircuito de un módulo es igual al de una de sus células multiplicada por el número de filas conectadas en paralelo.
- *Tensión nominal (V_n):* Es el valor de la tensión de diseño a la cual trabaja el panel. Indica si el módulo es el adecuado o no para utilizarlo en sistemas con esa tensión habitual de utilización.
- *Tensión a circuito abierto (V_{oc}):* Es el máximo voltaje que se mediría en un módulo si no hubiese paso de corriente entre los bornes del mismo ($I=0$). La tensión a circuito abierto de un módulo es la de cada una de sus células por el número de éstas conectadas en serie.
- *Potencia Máxima (P_M):* Es el valor mayor obtenido en el producto de la intensidad y la tensión del módulo fotovoltaico para cada uno de sus valores definidos por la curva tensión-intensidad del módulo y, por tanto, es la mayor potencia que puede proporcionar el módulo. También se le llama potencia pico del panel. La potencia máxima define los valores, unívocos, de intensidad y voltaje en el punto de máxima potencia. El voltaje V_M correspondiente al de máxima potencia es aproximadamente el 80% del valor V_{oc} .
- *Eficiencia del módulo:* Cociente entre la potencia eléctrica producida por el módulo y la mayor radiación incidente sobre el mismo. De acuerdo con las diversas tecnologías disponibles actualmente, se pueden observar los

siguientes márgenes de eficiencia dependiendo del material constructivo de las células fotovoltaicas.

Además de la eficiencia mencionada anteriormente, cabe destacar que el rendimiento medio de un módulo fotovoltaico está alrededor del 85%, ya que sufren pérdidas por suciedad, pérdidas de operación, etc.

- **Acumuladores Eléctricos**

Es el sistema de acumulación de la energía captada del sol, de manera que se pueda independizar la demanda de la producción. Así, la energía consumida en horas de oscuridad se habrá captado y almacenado previamente.

Los parámetros de identificación de un acumulador eléctrico son:

- Tipo: Para este tipo de sistemas se suelen utilizar baterías de plomo-ácido. A su vez dentro de éstas pueden encontrarse distintas variedades dependiendo del electrolito que contengan. Las más comunes son de Plomo-Calcio (Pb-Ca, con baja auto descarga y mantenimiento limitado) y las de Plomo-Antimonio (Pb-Sb, de tipo abierto, con mejores propiedades a bajos niveles de carga y bajo deterioro con los ciclos carga-descarga).
- Capacidad: Es la cantidad de energía que puede suministrar una batería en unas determinadas condiciones de trabajo. Se expresa en Amperios-hora (Ah). La capacidad está influenciada por la temperatura, aumentando si ésta aumenta y disminuyendo en caso contrario.



Figura 13.3 *Batería abierta de varilla*

- **Tensión:** El acumulador es una fuente de tensión continua. Los valores más habituales de ésta son 2 y 12V.
- **Profundidad de descarga:** Es la cantidad, en porcentaje, que se ha descargado una batería en un proceso de descarga. La vida útil de una batería depende de los procesos de carga y descarga, de forma que cuanto menos profundos sean éstos, mayor será la duración de la batería. La conexión de las baterías se realizará en serie, en paralelo o en serie-paralelo de manera que la tensión que se obtenga sea la correspondiente al campo generador.
- ***Regulador.***

Es el equipo que controla los procesos de carga y descarga de las baterías. Controla el proceso de carga evitando que, con la batería a plena capacidad, los módulos fotovoltaicos sigan inyectando corriente en la misma. Se lleva a cabo anulando o reduciendo el paso de corriente del campo fotovoltaico. Del mismo modo controla el proceso de descarga evitando que el estado de carga de la batería alcance un valor bajo cuando se está consumiendo la energía almacenada, desconectando los circuitos de consumo.



Figura 13.4 Regulador.

- ***Inversor.***

También llamado convertidor o rectificador. Se encarga de adaptar la corriente generada en los módulos a las condiciones de consumo de las distintas cargas eléctricas. La denominación de cada uno de ellos depende del tipo de corriente que transforme. Así se denomina inversor al elemento que transforma la corriente continua en alterna, convertidor al que transforma la alterna en continua y rectificador al que transforma la continua en continua. Se conecta en serie con el regulador, entre éste y las cargas.



Figura 13.5 *Inversor.*

Los módulos fotovoltaicos y las baterías trabajan en corriente continua, por eso cuando las cargas trabajan en continua es necesario un rectificador, mientras que si las cargas trabajan en alterna será necesario un inversor continua-alterna. Los parámetros que caracterizan un inversor son:

- *Tensión nominal:* Es la tensión a aplicar entre los bornes de entrada al inversor.
- *Potencia nominal:* Es la potencia que puede suministrar el inversor de forma continua. La potencia del inversor debe ser tal que sea capaz de arrancar y operar todas las cargas de la instalación.

- *Capacidad de sobrecarga:* Capacidad de suministrar una potencia superior a la nominal y el tiempo que ésta situación se puede mantener.
- *Eficiencia:* Es la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega a la utilización y la potencia eléctrica que consume del generador o de las baterías.
- *Forma de onda:* La señal a la salida del inversor se caracteriza por su forma de onda. El inversor más perfecto es el de onda senoidal, pero también el más caro. Para determinadas aplicaciones, como por ejemplo iluminación y pequeños motores, puede utilizarse un inversor de onda cuadrada, más barato.
- **Otros elementos.**

Además de los elementos característicos de las instalaciones fotovoltaicas existen otros elementos que son necesarios para la seguridad y el control de la instalación.

En una instalación fotovoltaica hay que prestar especial atención a la parte de corriente continua. A continuación se muestran los elementos más característicos.

- *Cableado:* En instalaciones fotovoltaicas se utilizan secciones de cableado superiores a las utilizadas en instalaciones convencionales debido a la utilización de bajas tensiones continuas y requerimientos de potencia de cierta consideración.
- *Conexiones:* Se deben utilizar cajas de conexiones estancas y con grado de protección IP adecuado y cableado protegido contra la humedad, la radiación ultravioleta y otros fenómenos atmosféricos, dada su instalación a la intemperie.
- *Protecciones:* No es recomendable utilizar aparatos de corriente alterna en continua, por esto los elementos de protección (fusibles,

magnetotérmicos, interruptores y diodos) deben ser adecuados para los valores de tensión y corriente de una instalación fotovoltaica.

- *Monitorización y control:* Indicadores y visualizadores que muestran al usuario datos sobre la instalación y su funcionamiento. Éstos indicadores se encuentran en los propios aparatos de control. La información que pueden facilitar es: tensión del campo fotovoltaico, tensión de la batería, intensidad del campo fotovoltaico, intensidad de consumo, carga de la batería, regulación de la carga, energía eléctrica generada por el campo de captadores, energía consumida, etc.

Todos los componentes y materiales seleccionados cumplirán lo dispuesto en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión o legislación equivalente referente a protecciones y seguridad de las personas.

Por ello se incluirán todas las protecciones necesarias para proteger a la instalación frente a sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones. Dichas protecciones afectarán tanto a línea del generador como a la línea de cargas.

Los materiales situados en intemperie se protegerán contra los agentes ambientales, en particular contra el efecto de la radiación solar y de la humedad.

14. Demanda energética.

El sistema de captadores fotovoltaicos deberá suministrar energía eléctrica suficiente para abastecer a la vivienda y todos los sistemas asociados, como ACS y extracción de agua del pozo.

Cuanto más precisa sea la información sobre consumos manejada, más ajustado será el dimensionado del sistema, de manera que se optimicen los recursos disponibles alejándonos del sobredimensionado y los costes asociados a él, que en estas instalaciones son elevados.

Antes de comenzar con el cálculo del consumo eléctrico conviene tener en cuenta varias cuestiones. La primera de ellas es el tipo de consumo, ya que se deberá sopesar no sólo el consumo diario (energía que se debe producir y almacenar para cubrir el consumo a lo largo del periodo establecido) sino también el consumo pico o potencia a suministrar en cada momento.

Asimismo, es de gran importancia la temporalidad de la demanda en este tipo de instalaciones. Dimensionar una instalación que soporte todo el consumo de una vivienda de forma simultánea implica un gran número de paneles y baterías, los elementos más costosos del sistema. Por ello, se tiende a distribuir las cargas en el tiempo de forma que no supongan una demanda a un mismo tiempo.

Elegir este tipo de energía implica un proceso previo de concienciación. El consumo en este tipo de instalaciones debe ser si cabe más responsable que en una instalación conectada a red, y debe buscar el ahorro y la máxima eficiencia posibles.

Es por esto que cargas destinadas a producir frío (como sistemas de aire acondicionado) o calor (calefacción, cocinas, calentadores, etc.) deben cubrirse a partir de otras energías con mayor eficiencia que la eléctrica, como el gas. Una excepción a este párrafo la constituyen los frigoríficos actuales, de alta eficiencia cuando su alimentación es de corriente continua. Además del frigorífico, las bombas de impulsión del sistema de ACS y extracción, y la iluminación de la vivienda puede abastecerse con

corriente continua. En nuestro caso, tan sólo el frigorífico se alimentará con corriente continua ya que añadirle además la iluminación supondría duplicar el circuito eléctrico, aumentando costes y disminuyendo el confort en la vivienda. Cabe apuntar que en la iluminación de la vivienda se emplearán lámparas de bajo consumo.

Para el estudio de las cargas en la vivienda debe tenerse en cuenta como ya se ha mencionado tanto la potencia nominal de cada elemento como su período de actividad durante el día.

En la siguiente tabla se recogen los consumos de todas las cargas que demandan electricidad en la vivienda, viniendo dados a través de su potencia y el tiempo de utilización.

EQUIPO	POTENCIA	CANTIDAD	FRECUENCIA DE USO	TIEMPO DE USO	Wh/Día
Frigorífico	32W	1	Diario	24 h	768
Plancha	900W	1	Cada 4 días	0.5 h	450
Lavadora	400W	1	Cada 3 días	0.67 h	268
Televisión	120W	1	Diario	2.5 h	300
Ordenador	50W	1	Diario	1 h	60
Batidora o similar	120W	1	Cada 2 días	0.1 h	12
Iluminación					
SALÓN	Lámpara 30W	2	Diario	1	60
	Lámpara 15W	1		2	30
DORMITORIOS	Lámpara 20W	2	Diario	1	40
	Lámpara 10W	2		0.5	10
COCINA	Fluorescente 20W	1	Diario	1.5	30
SALA EQUIPOS	Fluorescente 20w	1	Diario	0.25	5
BAÑO	Fluorescente 20W	1	Diario	1	20
TOTAL ILUMINACIÓN					160

Tabla 14.1 Consumos eléctricos diarios de la vivienda.

Lo que supone una potencia consumida en la vivienda de 2053 Wh/día.

Además de las cargas de la vivienda, el sistema deberá alimentar a las bombas del sistema de extracción del pozo y de la circulación del sistema de ACS, como se muestra a continuación.

EQUIPO	POTENCIA	CANTIDAD	FRECUENCIA DE USO	TIEMPO DE USO (h)	Wh/Día
Bomba extracción pozo	240	1	Diario	0.5	120
Bomba Circulación ACS	5	2	Diario	4	40
Bomba presurizado circuito agua fría	5	1	Diario	1.5	17.5
Bomba presurizado circuito ACS	5	1	Diario	1.5	17.5
TOTAL					195

Tabla 14.2 *Consumos eléctricos diarios de las bombas ACS y pozo.*

Lo que finalmente supone una potencia a instalar de 2250 Wh/día. Esta potencia total puede minorarse obteniendo una distribución del consumo de la instalación. Para ello, se simula el consumo diario realizando un análisis horario del mismo.

Realizando una simulación de las distintas cargas que estarán en funcionamiento durante un día, en periodos de una hora de duración, se obtienen los datos reflejados en la siguiente tabla. Resulta obvio que el consumo eléctrico no será el mismo durante todos los meses del año, por lo que la potencia requerida sufrirá variaciones. La tabla siguiente muestra la distribución diaria de consumos para enero.

HORA	CARGAS	POTENCIA
0:00 – 1:00	FRIGORÍFICO	32 W
1:00 – 2:00	FRIGORÍFICO	32 W
2:00 – 3:00	FRIGORÍFICO	32 W
3:00 – 4:00	FRIGORÍFICO	32 W
4:00 – 5:00	FRIGORÍFICO	32 W
5:00 – 6:00	FRIGORÍFICO	32 W
6:00 – 7:00	FRIGORÍFICO	32 W
7:00 – 8:00	FRIGORÍFICO+LAMPARAS BAÑO+BOMBAS ACS	60 W
8:00 – 9:00	FRIGORÍFICO+LAMPARAS COCINA+SALA EQUIPOS	47 W
9:00 – 10:00	FRIGORÍFICO	32 W
10:00 – 11:00	FRIGORÍFICO	32 W
11:00 – 12:00	FRIGORÍFICO	32 W
12:00 – 13:00	FRIGORÍFICO+BOMBA POZO	152 W
13:00 – 14:00	FRIGORÍFICO+BOMBA ACS	42 W
14:00 – 15:00	FRIGORÍFICO+ELECTRODOMESTICO COCINA+BOMBA ACS	54 W
15:00 – 16:00	FRIGORÍFICO+TELEVISOR+BOMBA ACS	102 W
16:00 – 17:00	FRIGORÍFICO+LAVADORA/PLANCHA+BOMBA ACS	492 W
17:00 – 18:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA SALON	67 W
18:00 – 19:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA SALON	67 W
19:00 – 20:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA HABITACION+ORDENADOR	102 W
20:00 – 21:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA SALON+COCINA+BOMBAS AGUA	72 W
21:00 – 22:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA SALON+TELEVISOR	97 W
22:00 – 23:00	FRIGORÍFICO+LAMPARA SALON+TELEVISOR	97 W
23:00 – 0:00	FRIGORÍFICO+LAPARA SALON+ BOMBAS AGUA	60 W
TOTAL		1951 W

Tabla 14.3 *Desglose horario del consumo eléctrico.*

Puede comprobarse que, teniendo la precaución de no mantener los aparatos que más consumen simultáneamente activos, podríamos disminuir la potencia total necesaria de la instalación. Además, se tratará de que la utilización de los equipos que más consumen coincida con las horas centrales del día, tiempo en el que la energía captada será máxima y se minimizará la descarga de las baterías.

Tomamos el mayor consumo calculado para el diseño, que será la suma del consumo de todas las cargas, tanto vivienda como sistemas complementarios.

La potencia en corriente continua será

$$E_{CC} = \sum_i P_{CCi} \cdot h_i$$

Donde:

P_{CCi} es la potencia del equipo i de corriente continua, en vatios [W].

h_i son las horas de utilización diaria del equipo i.

Como ya quedó expuesto, únicamente se empleará corriente continua para el frigorífico. Así pues,

$$E_{CC} = P_{frig} \cdot h_{frig} = 768 \text{ W}_{DC}$$

Del mismo modo se calcula la potencia consumida en alterna.

$$E_{AC} = \sum_i P_{ACi} \cdot h_i$$

Donde:

P_{ACi} es la potencia del equipo i de corriente alterna, en vatios [W].

h_i son las horas de utilización diaria del equipo i.

Exceptuando el frigorífico el resto de equipos eléctricos consumirán potencia en alterna, lo que supone un consumo total

$$E_{AC} = 1480 \text{ W}_{AC}$$

El consumo total diario, E_d [Wh/día] será la suma de los consumos de corriente alterna y continua, teniendo además en cuenta los rendimientos de regulador e inversor.

$$E_D = \left(\frac{E_{CC}}{\eta_{REG}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{REG} \cdot \eta_{INV}} \right)$$

Donde:

η_{REG} es el rendimiento del regulador. Se toma un valor aproximado de 0,98.

η_{INV} es el rendimiento del inversor. Para esta aproximación tomaremos un valor de 0.8

Por la tanto la potencia total demandada por la instalación será

$$E_D = 2672 \text{ W}$$

15. Evaluación del recurso solar.

En este apartado realizamos una evaluación de la energía que llega desde el Sol a nuestros captadores solares. Para facilitar el tratamiento de los datos con las unidades de consumo eléctrico, en esta ocasión se representa la radiación con unidades de kWh/m² día. Las horas solares pico (HSP) se corresponden con las horas diarias que la radiación solar sobre nuestros paneles fotovoltaicos alcanza un valor de 1000 W/m².

El valor numérico de las horas pico solar y la radiación media diaria coincide si las unidades de la radiación diaria vienen en kWh/m² día.

MES	I_0 (kWh/m ² día)	K_β (factor de corrección)	I_β (kWh/m ² día)	HSP _{β}
ENERO	1,61	1,39	2,24	2,24
FEBRERO	2,48	1,29	3,19	3,19
MARZO	3,66	1,16	4,25	4,25
ABRIL	5,03	1,04	5,23	5,23
MAYO	5,47	0,95	5,20	5,20
JUNIO	6,37	0,92	5,86	5,86
JULIO	7,12	0,95	6,76	6,76
AGOSTO	6,39	1,05	6,71	6,71
SEPTIEMBRE	4,73	1,21	5,72	5,72
OCTUBRE	3,11	1,39	4,33	4,33
NOVIEMBRE	1,98	1,5	2,96	2,96
DICIEMBRE	1,47	1,48	2,18	2,18

Tabla 15.1 Radiación recibida por los paneles

16. Dimensionado de la instalación.

16.1 Potencia del campo generador

Conocidas las necesidades mensuales y el aporte energético en el mismo periodo, se procede ahora al cálculo de la potencia requerida para el campo de captadores fotovoltaicos.

La simulación de consumos expuesta anteriormente estaba realizada para un día medio del mes de Enero, cuando se hace necesaria la iluminación desde horas tempranas de la tarde. La demanda eléctrica, al igual que la de ACS sufre variaciones mensuales significativas, tanto por la cantidad de horas de luz disponibles como por los hábitos personales que invitan a pasar menos tiempo en casa cuando los días se alargan. Todo esto se aprecia mejor en la figura siguiente, que muestra la variación mensual de la demanda eléctrica en una vivienda

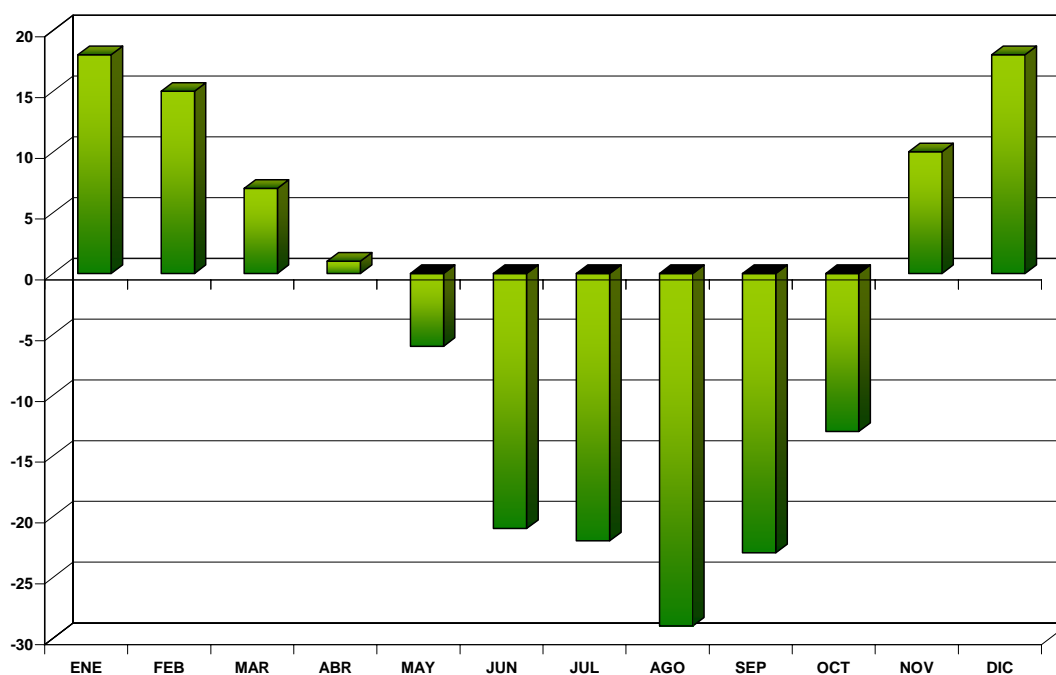


Figura 16.1 *Variación mensual de la demanda eléctrica.*

Al tratarse de una instalación de uso permanente, el dimensionado se realizará para el mes más desfavorable. Se entiende por mes más desfavorable aquel en el que el cociente entre la energía disponible y la demanda es menor.

La tabla siguiente recoge la relación entre la energía disponible y el consumo energético de la vivienda. Ésta relación servirá para determinar el mes más desfavorable, que servirá como base de cálculo para el diseño de la instalación.

MES	Energía disponible, I_p (kWh/m ² día)	Consumo de energía, E_d (kWh/m ² día)	Relación I_p/E_d
ENERO	2,24	2,25	0,995
FEBRERO	3,19	2,17	1,471
MARZO	4,25	2,02	2,104
ABRIL	5,23	1,93	2,71
MAYO	5,20	1,8	2,889
JUNIO	5,86	1,59	3,685
JULIO	6,76	1,51	4,477
AGOSTO	6,71	1,43	4,692
SEPTIEMBRE	5,72	1,49	3,834
OCTUBRE	4,33	1,71	2,532
NOVIEMBRE	2,96	2,12	1,396
DICIEMBRE	2,18	2,25	0,968

Tabla 16.1 Relación aporte solar-demanda.

A la vista de los datos recogidos, se realizará el dimensionado para el mes de DICIEMBRE.

Al contrario que en la instalación de ACS, donde se propone una cobertura mínima dependiendo de la zona geográfica en la que se encuentre la instalación (70% en este caso), la instalación fotovoltaica debe cubrir la totalidad de la demanda. Por ello su cobertura se tomará igual a la unidad.

Para el cálculo de la potencia del generador igualaremos la energía media diaria que se puede aportar con el consumo diario, con lo que se tiene:

$$P_{GENERADOR} = \frac{E_D}{\eta_{PANEL} \cdot HSP_{\beta}} = \frac{2,250}{0,85 \cdot 2,24} = 1,18kW$$

Donde:

η_{PANEL} es el rendimiento medio del panel fotovoltaico. Se considera un valor aproximado de 0.85

HSP_{β} corresponde a las Horas Pico Solar para el ángulo de inclinación β característico de la instalación.

El resto de parámetros son conocidos.

Conocida la potencia del campo de captadores, el número de paneles viene dado por:

$$N_{PANELES} = E\left(\frac{P_{GENERADOR}}{P_{PANEL}}\right) + 1, \text{ siendo el operador E la parte entera del cociente}$$

$$N_{PANELES} = E\left(\frac{1,18}{0,225}\right) + 1 = 6 \text{ Paneles}$$

Una vez calculado el número de paneles fotovoltaico, estimaremos el tipo de conexión entre los mismos, adaptándolo a las características del circuito mediante el número de ramas y paneles en cada rama (dicho de otro modo, mediante el número de módulos en serie y en paralelo). Así conseguiremos aportar la tensión y corriente requeridas por el circuito.

El número de paneles por rama fotovoltaica, o número de paneles en serie, vendrá dado por la tensión a la que se diseñe el circuito del generador. En este caso, se tomará como tensión nominal de este circuito 24V.

$$N_{PANELES.SERIE} = \frac{V_n}{V_{n_{panel}}} = \frac{24V}{29,2V} = 1 \text{ paneles.serie}$$

Donde:

V_n es la tensión nominal del circuito generador.

$V_{n \text{ panel}}$ corresponde a la tensión nominal del módulo fotovoltaico escogido.

De modo similar, el número de ramas del generador o paneles en paralelo se calcula según:

$$N_{\text{PANELES.PARALELO}} = \frac{N_{\text{PANELES}}}{N_{\text{PANELES.SERIE}}} = \frac{6}{1} = 6 \text{ paneles. paralelo}$$

La configuración final del campo de captadores seguiría el esquema de la figura adjunta.

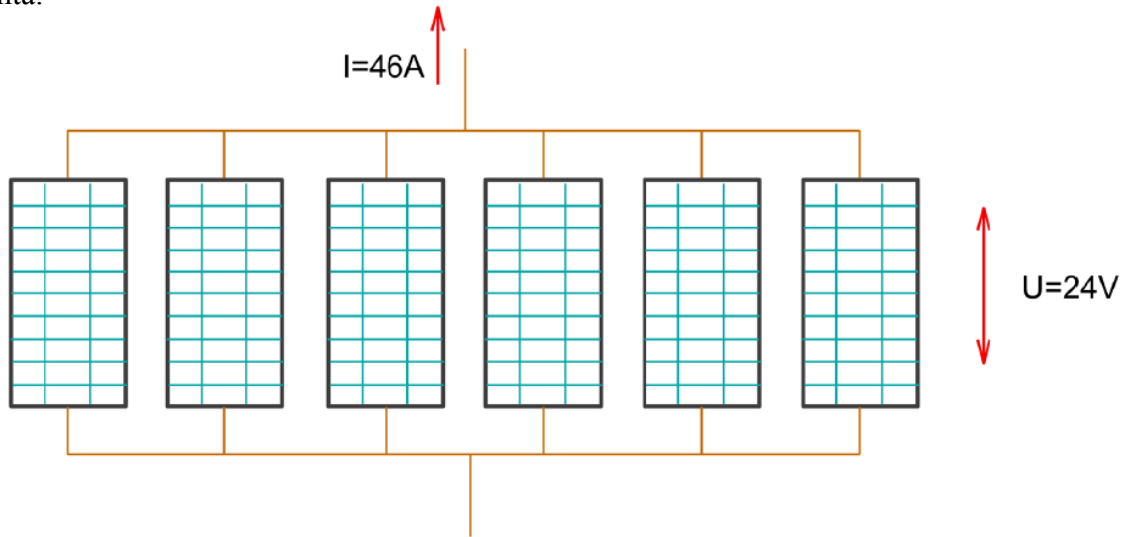


Figura 16.2 Distribución del campo de captadores

A modo de resumen, las características de tensión y corriente del campo generador son las siguientes.

	V_{oc} (V)	$V_{pm\acute{a}x}$ (V)	I_{sc} (A)	$I_{pm\acute{a}x}$ (A)	Serie	Paralelo
Por módulo	36,1	29,1	8,33	7,65	1	6
Totales	36,1	29,1	49,98	45,9	-	-

Tabla 16.2 Características del campo generador.

16.2 Acumulador.

Características.

Para el diseño del campo acumulador deben tenerse en cuenta varios parámetros del mismo.

- *Capacidad nominal (C_n).*
- *Profundidad de descarga (PD).*
- *Capacidad útil (C_u).* Capacidad en amperios hora disponible en función de la profundidad máxima de descarga. Cuanto mayor sea la capacidad de descarga permitida, más parecida es la capacidad útil a la nominal.
- *Condiciones de funcionamiento.* Al igual que para la selección del campo de captadores, se tendrá en cuenta para la selección del acumulador el consumo medio diario de la instalación en el mes de diseño. Este consumo debe incluir los rendimientos de inversor y regulador.
- *Autonomía (A).* Será el máximo número de días consecutivos que la instalación es capaz de satisfacer el consumo de electricidad en condiciones completamente desfavorables, es decir, a expensas de las baterías sin producción de energía en los paneles.

La capacidad de las baterías para esta instalación se dimensionará de forma que proporcione al menos 4 días de autonomía para la instalación.

Dimensionado.

La capacidad disponible del campo de baterías asegurará que se satisface la demanda durante el periodo de autonomía establecido. Por cuestiones de seguridad (pérdidas no contempladas, fallos en la instalación o el mantenimiento...) se aumentará la capacidad requerida en un 10%, por lo que la capacidad útil será, expresada en amperios hora (Ah),

$$C_u = \frac{1,1 \cdot E_D \cdot A}{V_n} = \frac{1,1 \cdot 2250 \cdot 4}{24} = 412,5 \text{ Ah}$$

La capacidad nominal (C_n) del campo de baterías se calculará a partir de la capacidad disponible (C_u) en función de la capacidad de descarga máxima permitida.

$$C_n = \frac{C_u}{PD_{MAX}} = \frac{412,5}{0,8} = 515,63 \text{ Ah}$$

Existe además una restricción en cuanto al tamaño del campo acumulador con el fin de que las corrientes de carga no resulten excesivamente bajas. De esta forma, se impone que la capacidad nominal se encuentre entre la capacidad nominal y 25 veces la corriente de cortocircuito del generador,

$$\frac{1,1 \cdot E_D \cdot A}{PD_{MAX} \cdot V_N} \leq C_U \leq 25 \cdot I_{CCGENERADOR}$$

Donde $I_{CC\ GEN}$ es la corriente de cortocircuito del sistema generador, que viene dada por el número de paneles conectados en paralelo y la corriente de cortocircuito en Condiciones Estándar de Medida (CEM) del panel.

$$I_{CC_{GEN}} = I_{CC_{PANEL}} \cdot N_{PANELES.PARALELO} = 8,33 A \cdot 6 = 49,98 A$$

Una vez conocida la capacidad necesaria que se debe cubrir, pasamos a la selección de las baterías. El número de baterías que formarán el acumulador vendrá dado por la expresión

$$N_{BAT} = \frac{C_N}{C_{100}} = \frac{515,63}{90} = 5,73$$

Por tanto serán necesarias 6 baterías.

Al igual que los captadores, los acumuladores se conectarán entre sí de forma que la tensión de las baterías sea la de diseño del campo generador. En esta instalación la tensión del generador y, por tanto, la del acumulador será de 24V, ya que es la tensión para la que existen mayor cantidad de elementos en el mercado (baterías, reguladores, inversores,...) y a un menor coste.

Las baterías formarán grupos de forma que cada grupo se conecte en serie para dar el voltaje necesario. A su vez los distintos grupos se conectarán en paralelo para dar la corriente necesaria. El número de baterías en serie y paralelo es

$$N_{BATERIAS_{SERIE}} = \frac{V_N}{V_{N_{BAT}}} = \frac{24}{12} = 2$$

$$N_{BATERIAS_{PARALELO}} = \frac{N_{BATERIAS}}{N_{BATERIAS_{SERIE}}} = \frac{6}{2} = 3$$

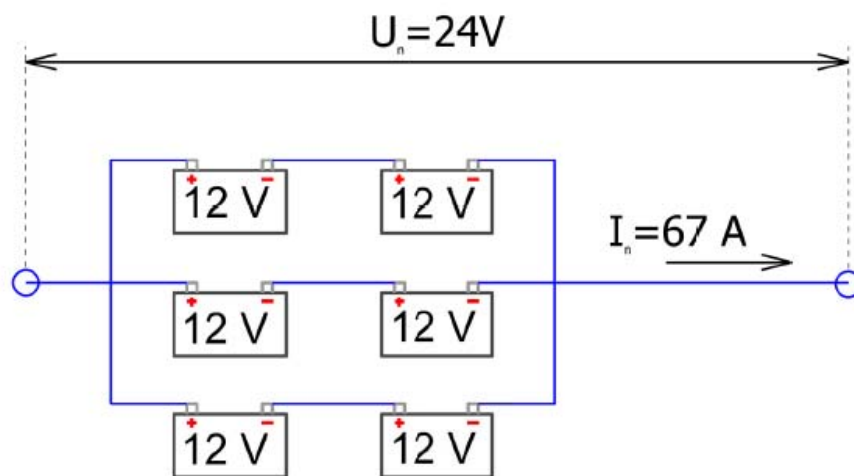


Figura 16.3 *Esquema del acumulador.*

16.3 Regulador.

El dimensionado del regulador se limitará a elegir un equipo comercial que se adapte a las características eléctricas del resto de la instalación. Sus funciones serán:

- Proteger a la batería frente a la sobrecarga y la sobre descarga.
- Disponer de alarma de baja carga de la batería y aumento de la carga manual y que se activen automáticamente cuando se alcancen los valores de consigna.
- Reconexión automática o manual.

Para ello, los principales requisitos a cumplir serán:

- El regulador deberá estar tarado para que se desconecte de la carga cuando se alcance la máxima profundidad de descarga.
- El voltaje de fin de carga debe estar en el rango 2.3-2.4 V/vaso a 25°C.
- La reconexión a la carga debería ser 0.08 V/vaso (ó 0.5 V para 12 V) superior al voltaje de desconexión de la carga.
- Los voltajes de desconexión y reconexión deben tener una precisión de $\pm 1\%$ y mantenerse constantes en todo el rango posible de variación de temperatura.

La intensidad del regulador se dimensionará, para el voltaje del campo de paneles seleccionado, como el cociente entre la potencia, en W_p , del campo de paneles y el voltaje en el punto de máxima potencia del campo de paneles.

16.4 Inversor.

Su dimensionado será, como en el caso del regulador, la selección de un equipo comercial adaptado a los parámetros eléctricos del resto de los componentes. Se ha de tener en cuenta:

- Tensión nominal de entrada. El inversor debe ser capaz de transformar distintas tensiones, ya que la tensión de entrada no siempre tendrá un valor fijo.
- Potencia nominal. La potencia nominal del inversor es, en ocasiones, superada por la puesta en marcha de determinados elementos de consumo. Por ello, el inversor deberá soportar las siguientes sobrecargas:
 - 160% de la potencia nominal durante 1 min.
 - 140% de la potencia nominal durante 3 min.
 - 120% de la potencia nominal durante 10 min.

Asimismo, la tensión de salida no deberá ser superior a un 5% de la tensión nominal de salida en inversores de onda senoidal o un 10% en inversores de onda cuadrada.

16.5 Cableado.

La longitud del cableado en los distintos circuitos que componen la instalación solar fotovoltaica será la mínima posible. Por ello colocaremos tanto los módulos como el acumulador, inversor y regulador en una misma ubicación.

Esta optimización del cableado se debe a las pérdidas eléctricas que se producen a través del mismo. El cálculo de la sección del cableado puede hacerse mediante dos tipos de hipótesis distintas:

- Criterio de intensidad máxima admisible.
- Criterio de caída máxima de tensión admisible.

En este caso la hipótesis más restrictiva será la máxima caída de tensión admisible, por lo que será la que aplicaremos. Esta hipótesis se basa en que, para cualquier condición de trabajo, los conductores de la parte de continua deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior, incluso yendo cualquier terminal intermedio, a los valores especificados a continuación:

- Caída de tensión máxima entre generador y regulador/inversor: 3%
- Caída de tensión máxima entre regulador y batería: 1%
- Caída de tensión máxima entre inversor y batería: 1%
- Caída de tensión máxima entre regulador e inversor: 1%
- Caída de tensión máxima entre inversor/regulador y cargas: 3%

Además, las mínimas secciones de cables en cada una de las líneas, será como mínimo de las secciones siguientes:

- 2,5 mm² del generador al regulador.
- 4 mm² del regulador a las baterías.

Se aplicará la siguiente expresión para obtener la sección del cableado de cada circuito,

$$S = 3,448 \cdot \frac{L \cdot I}{V_{AB} \cdot \Delta V}$$

Donde:

S es el área de la sección del conductor (mm²)

L es la longitud del conductor (m)

I es la intensidad que de corriente circulante (A)

V_{AB} es la tensión del circuito considerado (V)

ΔV es la caída de tensión

Del resultado obtenido al evaluar esta expresión obtenemos la sección mínima del conductor. Se tomará como definitiva la sección normalizada inmediatamente superior dada por la tabla 12 del documento ITC-BT, Instrucción Técnica Complementaria para Instalaciones de Baja Tensión, que se muestra a continuación. Se utilizará para todo el cableado un conductor de cobre con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE).


Sección nominal mm ²	Tres cables unipolares (1)		
			
	XLPE	EPR	PVC
6	46	45	38
10	64	62	53
16	86	83	71
25	120	115	96
35	145	140	115
50	180	175	145
70	230	225	185
95	285	280	235
120	335	325	275
150	385	375	315
185	450	449	365
240	535	515	435
300	615	595	500
400	720	700	585
500	825	800	665
630	950	915	765

Tabla 16.3 Sección normalizada del cableado según ITC BT

Los datos para cada línea se recogen en la siguiente tabla:

LINEA	L (m)	I (A)	V (V)	ΔV (%)	S (mm ²)	S _{nom} (mm ²)
Generador – Regulador	6	61,2	29,4	0,882	48,5	50
Baterías – Regulador	2,5	80,6	24	0,294	94,44	95
Regulador – Inversor	2	30	24	0,294	8,82	10
Inversor - CGP	8	15,3	230	6,9	0,4	6

Tabla 16.4 Sección del cableado de cada circuito.

Además, se protegerán tanto el inversor como el regulador de picos de corriente que pudiesen causar deterioro a través de fusibles.

En cada uno de los circuitos, se permitirá un pico de corriente del 20% antes de proceder a la desconexión por fallo del fusible. Así, para la línea generador-regulador se empleará un fusible que cumpla

$$I_{fusible} = 1,2 \cdot I_{m\acute{a}x} = 1,2 \cdot 61,2 A = 73,44 A$$

Que se corresponde con un fusible de 80A.

Para la línea baterías-regulador el fusible utilizado deberá ser

$$I_{fusible} = 1,2 \cdot I_{m\acute{a}x} = 1,2 \cdot 80,6 A = 96,72 A$$

Que se corresponde con un fusible normalizado de 100A.

Se protegerá además la instalación con el correspondiente uso de picas a tierra en captadores, inversor y baterías.

16.6 Sistema de apoyo

Pese a que el dimensionado de la instalación se ha realizado para proporcionar de una autonomía de varios días de consumo a la vivienda, podrían darse situaciones en las que la demanda no pudiese satisfacerse a través del sistema fotovoltaico. Éstas situaciones pueden ser de distintos tipos, ya sean averías, situaciones climatológicas adversas o simplemente necesidad de utilizar una mayor potencia puntual, como al emplear aparatos de construcción (soldador, cortador, taladro...)

Por ello, se planea la adquisición de un grupo generador compatible con la instalación fotovoltaica existente, que realice las funciones de carga de baterías cuando sea necesario. También debe poder proporcionar potencia independiente del sistema fotovoltaico directamente al CGP.

Escogemos un generador diesel de 5 kW de potencia, insonorizado dada la cercanía con la vivienda y con una salida de 24V para realizar la carga de las baterías. Éste generador se tendrá además en cuenta en el estudio económico como perteneciente a la instalación fotovoltaica, así como su consumo y mantenimiento.



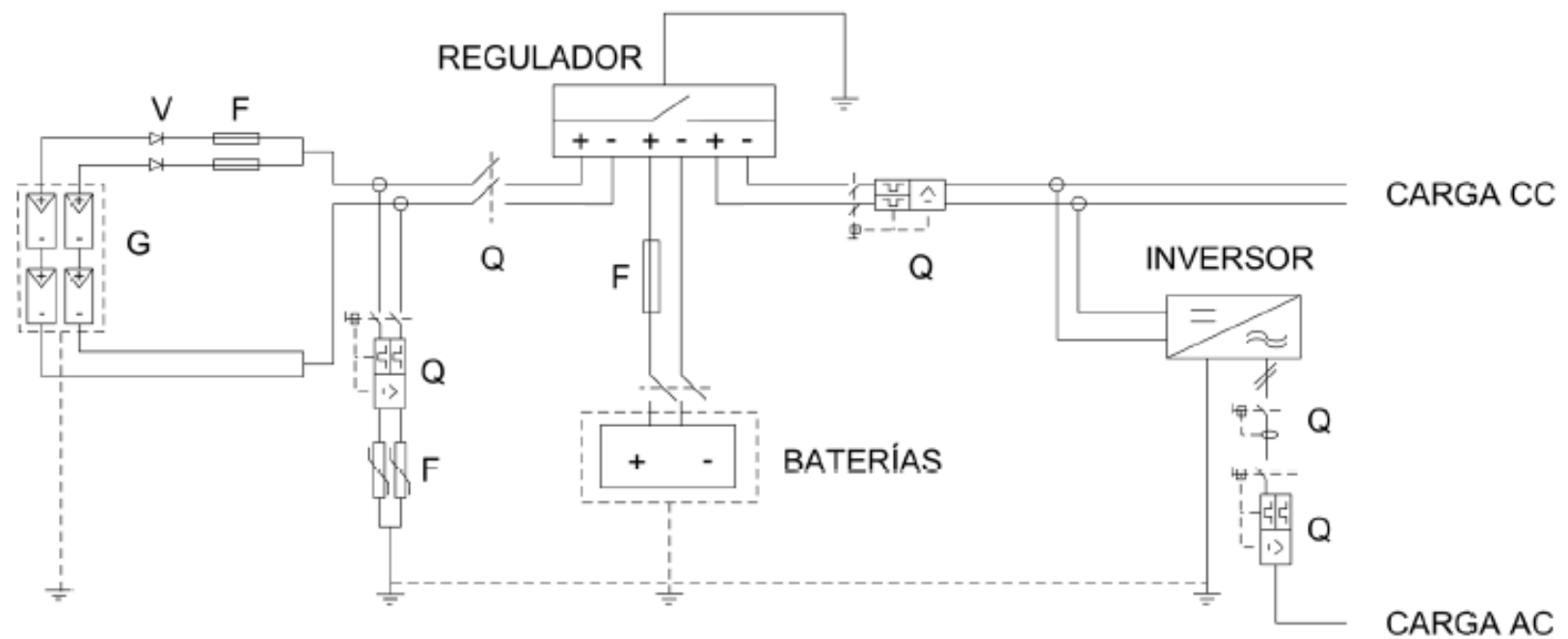
Figura 16.4 *Generador diesel de apoyo.*

Estudio económico.

Como último paso del proyecto realizaremos una valoración económica de la instalación, así como de las posibles alternativas a las energías renovables para un caso de vivienda aislada como el que nos ocupa.

En cualquier caso, el emplazamiento de la vivienda obliga a optar por sistemas independientes de generación. Escogemos como posibles alternativas a las energías renovables el calentador de gas en el caso de la producción de ACS. Para la electrificación, son dos las posibles alternativas a las energías limpias; por un lado, un generador diesel y por otro, la conexión con una línea de media tensión alejada de la vivienda.

Para este estudio, no se tendrá en cuenta los costes de la instalación doméstica, por ser la misma para cualquiera de las alternativas consideradas. En el caso del suministro de agua, únicamente se tendrá en cuenta a la hora de calcular la energía demandada por el global de la instalación ya que, al igual que la instalación doméstica, constituye la única forma de abastecimiento de agua posible.



F = ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

G = GENERADOR

Q = INTERRUPTOR PARA CIRCUITO DE FUERZA

V = DIODOS

Figura . Esquema eléctrico de la instalación fotovoltaica

CAPÍTULO V

Estudio económico

17. *Estudio económico de la instalación solar.*
18. *Estudio económico para una instalación alimentada a partir de combustibles fósiles.*
19. *Estudio económico para una instalación eléctrica de red.*
20. *Comparativa.*

19. Estudio económico para la conexión a red.

La vivienda se encuentra a una distancia de 800 metros de una línea eléctrica de media tensión de la que podría obtenerse una conexión a través de la empresa eléctrica correspondiente. Será necesaria la construcción de la línea eléctrica resultante y su soportado, así como de un transformador para adaptar las características de la línea de media tensión a nuestra instalación de baja tensión. Para el calentado del agua se considerará el instalado de un termo eléctrico que mantenga la temperatura a la temperatura de consumo. Los gastos de mantenimiento de la conexión a la red son nulos, ya que se procede a una cesión a la empresa distribuidora de la línea construida.

- **INVERSIÓN INICIAL**

ACS

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
1	Termo eléctrico 100 l. (1500W)	207,24	207,24
1	Instalación y transporte	97	97
TOTAL			304,24 €

Electricidad

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
8	Columna de acero de 8 m de altura formada por angulares	408,24	3.265,92
800 m	Cable de aluminio trenzado	5,42	4.336
1	Transformador 20KV- 230V	10.717	10.717
1	Mano de obra	2.350	2.350
TOTAL			20.668,92 €

17. Estudio económico de la instalación solar.

Tendremos en cuenta de una parte los costes específicos del montaje y adquisición de los equipos necesarios y por otra parte los costes de operación y mantenimiento asociados a los equipos auxiliares.

- **INVERSIÓN INICIAL**

Sistema ACS

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
2	Captador solar Isofotón Isotherm	643	1286
1	Depósito acumulador 200l	843	843
2	Bomba circulación Grundfos	221	442
1	Vaso de expansión	22	22
1	Intercambiador de calor de placas. Alfa Laval	302	302
16 m	Tubería de cobre 10/12	2,60	41,6
1	Material de conexionado (codos, uniones...)	65	65
1	Instrumentación (termómetro, manómetro...)	42	42
1	Líquido caloportador Glicol 37	95	95
6	Válvulas de seguridad y aislamiento	9,50	57
1	Estructura Sujeción	360	360
1	Disipador de calor	240	240
16 m	Aislante para conducciones (30mm)	5,5	88
4 m ²	Aislante para acumulador (50mm)	11	44
1	Caldera de gas JUNKERS	340	340
1	Materiales varios (tortillería, fijaciones, pegamentos...)	90	90
1	Mano de obra	700	700
TOTAL			5.057,6€

Sistema Fotovoltaico

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
8	Módulos fotovoltaicos	462,51	3700,08
1	Inversor	245	245
1	Regulador	44,85	44,85
1	Generador diesel	1.386,26	1.386,26
2,5	Cableado cobre 95 mm ²	3,55	8,88
2	Cableado cobre 50 mm ²	2,8	5,6
6	Cableado cobre 10 mm ²	1,35	8,1
8	Cableado cobre 6 mm ²	0,98	7,84
6	Baterías	401,20	2.407,2
1	Otros	100	100
16 m ²	Estructura soporte	29	464
1	Instalación	530	530
TOTAL			8.908,41 €

• **COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Los costes de operación y mantenimiento para esta instalación son reducidos ya que el mantenimiento es bastante básico. El gasto mayor se produce con el cambio de baterías, que deberá realizarse a los 10 años, y en el apoyo al sistema de ACS por parte del calentador de gas.

Sistema ACS

El calentador de gas deberá aportar la diferencia energética entre la demanda de la vivienda y la producción del sistema solar térmico.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q_{TOTAL}	974,7	861,7	933,3	883,1	891,8	843,0	850,3	860,7	863,0	912,5	913,2	974,7
Q_{sol}	481,5	684,2	933,3	883,1	891,8	767,1	850,3	860,7	863,0	667,1	717,8	479,6
Q_{gas}	493,2	177,5	0	0	0	75,9	0	0	0	245,5	195,4	495,2

El total de calor aportado por el calentador es de 1.682,7 MJ.

Se toma un rendimiento del calentador de gas de 0,85 y, conocido el poder calorífico del butano (45,8MJ/kg), calculamos la masa necesaria de gas:

$$Q = m_{\text{butano}} \cdot L_c \cdot \eta_{\text{calentador}}$$

Donde:

m_{butano} es la masa de butano necesaria [kg].

L_c es el poder calorífico del butano [MJ/kg].

$\eta_{\text{calentador}}$ es el rendimiento del calentador [-].

Así, se necesitan 42,98 kg de gas butano.

La masa de gas contenida en una bombona de butano es de 12,5 kg, por lo que serán necesarias 3,43 bombonas anuales (4 bombonas reales).

El precio actual de la bombona de butano es de 11,68 €, produciéndose un incremento medio de un 12% anual.

Sistema Fotovoltaico

En cuanto al sistema fotovoltaico, dada la vida útil de las baterías, se requiere su sustitución a los 10 años de vida.

Pese a que la instalación está dimensionada con autonomía suficiente, se prevé, en el peor de los casos, que el sistema de apoyo que constituye el generador diesel deba utilizarse aportando un 10% de la energía anual, correspondiente a 82,13 kWh. El cálculo del coste para ésta aplicación se detalla en el siguiente apartado, calculando el coste producido por el generador diesel.

Además del coste del gas y las baterías, se requiere un mantenimiento global de la instalación, fijado en 150€/año.

18. Estudio económico para el uso de combustibles fósiles.

En este caso, la producción de ACS se realiza totalmente a partir de un calentador a gas. Para la generación eléctrica se utilizará un generador diesel de la potencia adecuada. Se utilizará un generador de arranque automático con la demanda, pero para evitar puestas en marcha constantes para demandas muy pequeñas se instalará baterías que el generador cargará. La instalación es similar el sistema solar fotovoltaico, sustituyendo los módulos por el generador diesel.

- **INVERSIÓN INICIAL**

ACS

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
1	Calentador de gas	340	340
1	Instalación	43	43
TOTAL			383 €

Electricidad

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Precio total
1	Generador diesel	1.386,26	1.389,26
1	Inversor	245	245
1	Regulador	44,85	44,85
12	Cableado	2,8	33,6
6	Baterías	401,20	2.407,2
1	Otros	100	100
1	Instalación	530	530
TOTAL			4.719,91 €

- **COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Sistema ACS

En este caso, el calentador de gas deberá aportar el total de la demanda energética para el calentado del agua.

El total de calor aportado por el calentador es de 10.762 MJ.

De nuevo, se toma un rendimiento del calentador de gas de 0,85 y, conocido el poder calorífico del butano (45,8MJ/kg), calculamos la masa necesaria de gas:

$$Q = m_{\text{butano}} \cdot L_c \cdot \eta_{\text{calentador}}$$

Donde:

m_{butano} es la masa de butano necesaria [kg].

L_c es el poder calorífico del butano [MJ/kg].

$\eta_{\text{calentador}}$ es el rendimiento del calentador [-].

Para esta configuración se necesitan 276,54 kg de gas butano, necesitándose en este caso un total de 22,12 bombonas (23 bombonas reales)

El precio actual de la bombona de butano es de 11,68 €, produciéndose un incremento medio de un 12% anual.

Sistema Generador diesel.

En el caso del generador, tomaremos como potencia de cálculo la misma que en el caso de la instalación fotovoltaica. El consumo del generador es de 0,275 kg/kWh consumido.

La potencia consumida en la vivienda es de 2,250 kWh diarios, por lo que el consumo anual de combustible es de 225,84 kg.

Estimamos un precio inicial de 1,099 €/kg y un incremento anual del 8%.

- **COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

ACS

El termo eléctrico se encargará en esta configuración de calentar el agua. Se conoce la potencia demandada, de 10.862 MJ anuales (2.989,44kWh).

Electricidad

En el caso del sistema eléctrico, la energía demandada es de 2,25 kWh diarios, que hacen un total de 821,25 kWh anuales.

El precio de la electricidad viene fijado por la compañía distribuidora, siendo de 0,117759 €/kWh . Además, se pagará el alquiler de equipos a la distribuidora, así como una cuota fija por kW contratado (3,3 kW) de 20,64 € al año.

20. Comparativa

Procedemos ahora a la comparación de resultados económicos calculados con los datos anteriores para cada una de las tres alternativas posibles. La comparación se realiza a partir de los costes tanto de instalación como de operación y mantenimiento de los primeros 20 años de funcionamiento, actualizando los resultados al primer año de la inversión.

Así, comparamos todas las cantidades en términos absolutos.

Instalaciones.

Los gráficos siguientes muestra el coste inicial de las instalaciones para las tres alternativas. Se comparan en primer lugar los sistemas de producción de ACS y electricidad por separado para posteriormente realizar una valoración conjunta. Sólo se tendrán en cuenta los costes fijos o de mantenimiento cuando se analice la instalación global.

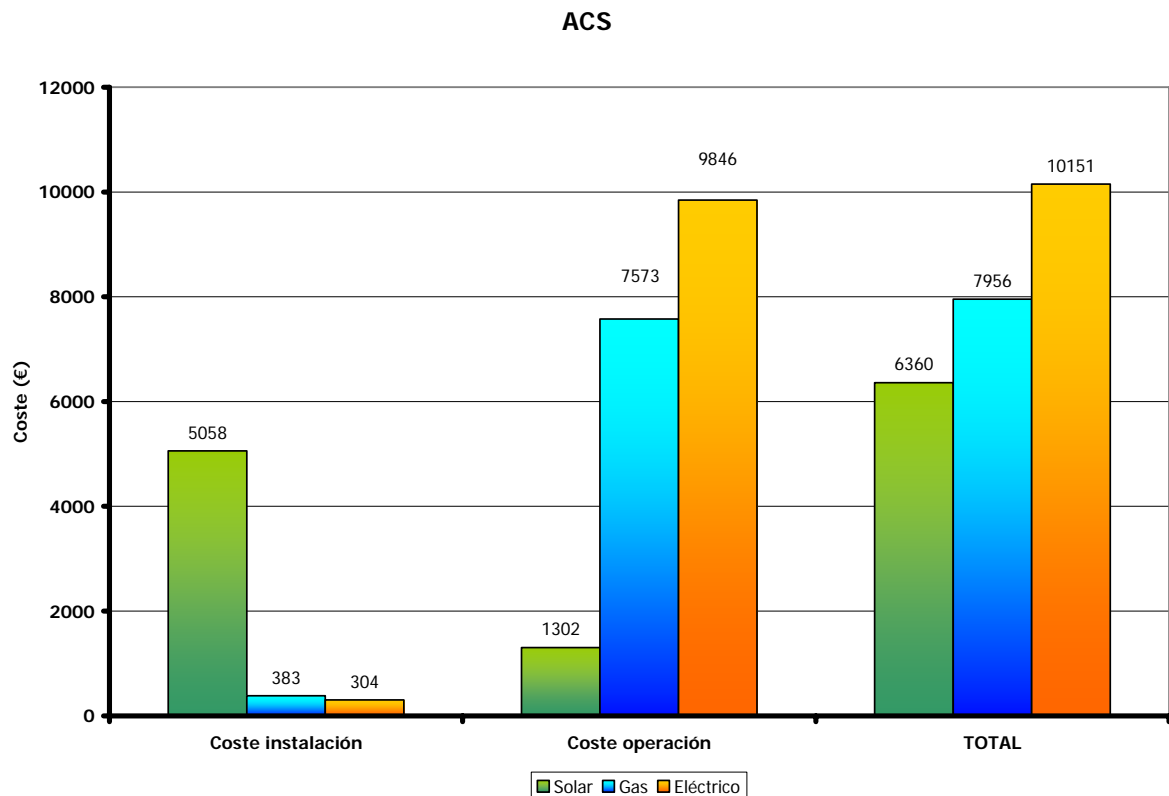


Figura 20.1 *Comparativa económica de costes de instalación.*

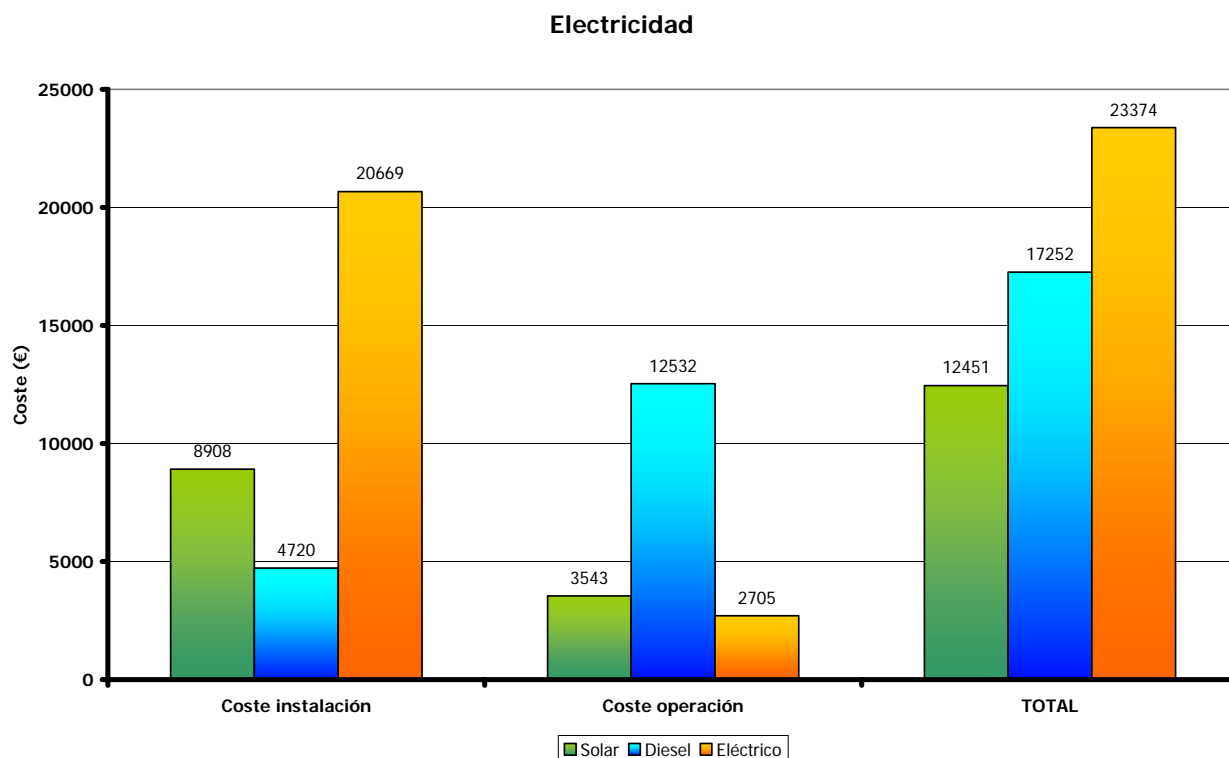


Figura 20.2 Comparativa económica de costes de operación y mantenimiento.

Se aprecia que el mayor coste se corresponde a la conexión a la línea de Media Tensión, dado que se deben asumir los costes de un transformador que encarece bastante la operación. Además, si bien los costes de operación para la producción de electricidad son asumibles, en el caso del agua caliente la producción mediante resistencias eléctricas es una opción claramente desechable de entre las escogidas.

En el caso de la producción de energía mediante combustibles fósiles, las diferencias con el sistema solar térmico es más ajustada, pero aún así el ahorro a favor de la energía limpia es de un 20%. En el caso de la producción eléctrica las diferencias se acentúan y la diferencia llega hasta el 28%.

El siguiente gráfico muestra los costes totales de las tres alternativas estudiadas, teniendo además en cuenta los costes fijos (conexión eléctrica) y de mantenimiento en cada opción.

Costes totales

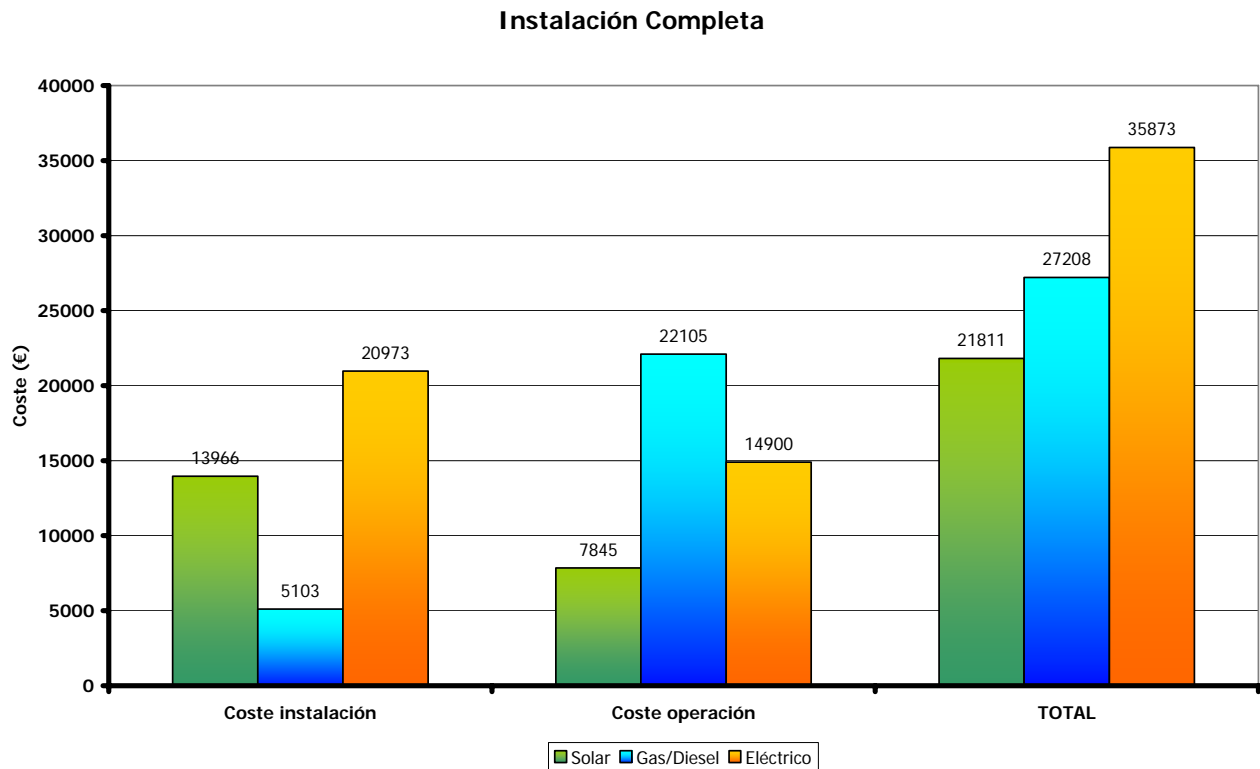


Figura 20.3 *Comparativa económica de costes totales.*

Finalmente, los datos globales de la instalación muestran claramente el nivel de ahorro de cada alternativa, siendo el uso de energía solar un 20% más barato que el empleo de combustibles fósiles, y éste a su vez un 25% más barato que el uso de electricidad convencional.

CAPÍTULO VI

Estudio ambiental

Estudio ambiental

Realizadas las valoraciones técnicas y económicas del proyecto, establecemos ahora el impacto ambiental del mismo, en forma de emisiones de CO₂ ahorradas. Esta valoración la realizamos comparando la instalación calculada con la alternativa consistente en la utilización de combustibles fósiles.

Como en el apartado anterior, supondremos que la energía demandada por el sistema de ACS es aportada por el calentador a gas y el generador eléctrico es alimentado por gasóleo.

Las siguientes tablas recogen un resumen de la energía aportada por cada sistema.

ACS

<i>MES</i>	<i>Q_{demandado} (MJ)</i>	<i>Q_{solar} (MJ)</i>	<i>Aporte gas (MJ)</i>
<i>ENE</i>	974,7	481,5	493,2
<i>FEB</i>	861,7	684,2	177,5
<i>MAR</i>	933,3	933,3	0
<i>ABR</i>	883,1	883,1	0
<i>MAY</i>	891,8	891,8	0
<i>JUN</i>	843	767,1	75,9
<i>JUL</i>	850,3	850,3	0
<i>AGO</i>	860,7	860,7	0
<i>SEP</i>	863	863	0
<i>OCT</i>	912,5	667,1	245,5
<i>NOV</i>	913,2	717,8	195,4
<i>DIC</i>	974,7	479,6	495,2
<i>TOTAL</i>	10.762,2	9.079,5	1.682,7

Electricidad

En el caso de la energía eléctrica, la instalación debe cubrir toda la demanda. En caso de no existir instalación solar, el generador deberá producir toda la energía necesaria.

<i>MES</i>	<i>E_{demandado} (MJ)</i>
<i>ENE</i>	251.1
<i>FEB</i>	226.8
<i>MAR</i>	251.1
<i>ABR</i>	243
<i>MAY</i>	251.1
<i>JUN</i>	243
<i>JUL</i>	251.1
<i>AGO</i>	251.1
<i>SEP</i>	243
<i>OCT</i>	251.1
<i>NOV</i>	243
<i>DIC</i>	251.1
<i>TOTAL</i>	3.199,5

Las emisiones de CO₂ que se producen durante la utilización de cada uno de los combustibles vienen dadas en el siguiente gráfico, obteniéndose unas emisiones de 55,9 kg/GJ para la combustión de gas y 73,3 kg/GJ en el caso del gasóleo.

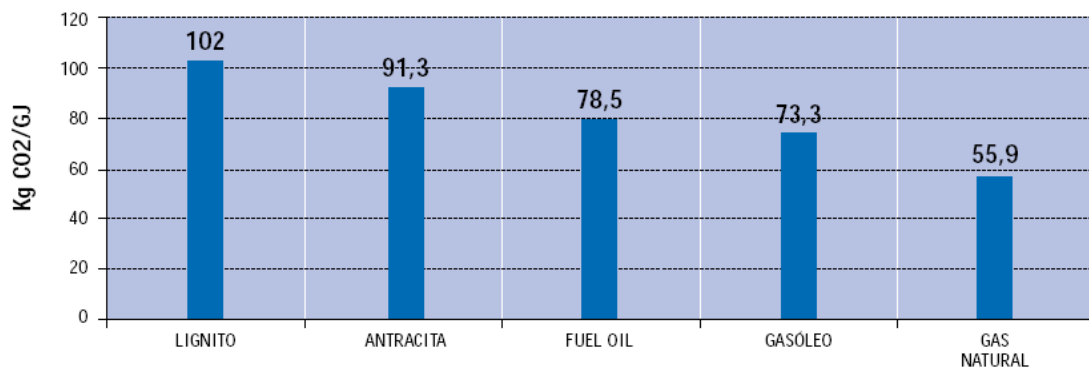


Figura VI.1 Emisiones de CO₂ por combustión de distintos combustibles fósiles

Con estos datos, procedemos al cálculo de las emisiones asociadas a nuestra instalación para el caso de la utilización de combustibles fósiles, así como para la instalación solar diseñada.

	Instalación Solar	Instalación Comb. Fósiles
<i>Emisiones CO₂ (kg)</i>	<i>94,06</i>	<i>836,35</i>

El ahorro de emisiones de CO₂ de la instalación diseñada es de un 88,7% frente a una instalación alimentada mediante combustibles fósiles.

CAPÍTULO VII

Conclusiones

Trabajos futuros

Conclusiones

Tras realizar el dimensionado de toda la instalación y valorar económicamente tanto el sistema diseñado como las posibles alternativas, pueden extraerse las siguientes conclusiones finales.

- La utilización de energías renovables para el total abastecimiento de una vivienda es una alternativa viable en cuanto a su diseño y construcción, cumpliendo toda la normativa aplicable y ofreciendo, para el caso que nos ocupa y la zona geográfica concreta, un buen rendimiento global.
- Económicamente, para el caso de viviendas aisladas, se destaca como la forma más viable de entre las posibles. Esto es debido a unos mínimos costes de operación y mantenimiento, que no se ven afectados por el alza de productos como la electricidad o los combustibles fósiles, fuentes de energía que se encarecen año tras año significativamente.
- Las diferencias económicas a favor de las energías limpias son incluso mayores de las aquí ofrecidas, dado que se ha evitado tener en cuenta subvenciones y planes favorecedores para este tipo de energía, que varían dependiendo de la Comunidad Autónoma en la que se encuentre la instalación.
- Finalmente, el estudio ambiental confirma la evidencia del gran ahorro de emisiones de CO₂ al utilizar energía solar frente a los combustibles fósiles, sumando otro aspecto favorable en la valoración global de este proyecto.

Trabajos futuros

El proyecto realizado es suficiente para garantizar la habitabilidad de la vivienda, pero también puede tomarse como punto de partida para una instalación mayor que incorpore otros sistemas para dotarla de un mayor confort. Sistemas como la calefacción y la climatización pueden ser también diseñados para funcionar con energía limpia, aprovechando además parte de la instalación que se ha diseñado en este proyecto.

La calefacción, que actualmente se consigue mediante la combustión de biomasa, puede implementarse también mediante captadores solares térmicos, recogiendo el calor procedente del sol de forma similar al sistema de ACS diseñado. La liberación de este calor en el interior de la vivienda puede realizarse mediante la instalación de un suelo radiante o un sistema de fancoils.

El sistema de climatización también es susceptible de funcionar con energías renovables. Mediante una máquina de absorción se podría diseñar un sistema de producción de frío, usándose el excedente de calor recogido por los captadores térmicos en verano, que actualmente se disipa, como contribución para la separación del refrigerante y con ello la obtención de frío para la vivienda.

ANEXOS

I. Bibliografía.

II. Programas MathCAD.

III. Planos de la vivienda.

IV. Tablas de resultados.

ANEXO I:

Bibliografía

Bibliografía

- “*Solar engineering of thermal processes*” J.A.Duffie & W.A. Beckman. [1]
- “*Transferencia de calor*” Yunus A. Çengel. [2]
- Código Técnico de la Edificación. [3]
- “*Mecánica de fluidos*” Frank M. White. [4]
- “*Energía Solar*” Lluís Jutglar. [5]
- “*Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*” Pedro Fernández Díez. [6]
- DTIE 8.03: *Instalaciones solares térmicas para producción de ACS*. [7]
- Reglamento de instalaciones de Baja Tensión. [8]
- “*Energía solar fotovoltaica: Manual del proyectista*” [9]
- Catálogos de fabricantes. [10]
- [11] “*Transferencia de calor en colectores solares planos considerando velocidad y dirección del viento variable*” Rodríguez, M.C., Rodríguez, P.A., Salgado, R., Venegas, M., Lecuona, A.

Apuntes

- Apuntes de la asignatura, Ingeniería Térmica I.
- Apuntes de la asignatura, Tecnología Eléctrica.
- Apuntes de la asignatura, Nuevas Fuentes de Energía.
- Apuntes de la asignatura, Tecnología del Frío.

Webs

- www.idae.es
- www.aemet.es
- www.censolar.com
- www.salvadorescoda.com
- www.grundfos.com
- www.isofoton.es
- www.mityc.es

ANEXO II:

Programas MathCAD

Programas MathCAD

- **Cálculo de la instalación de ACS sin pérdidas de calor.**

Dado

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = I_T \cdot A_c \cdot \eta_0 - Q_p$$

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici})$$

$$E_{ic} = \frac{m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{c_{min} \cdot (T_{co} - T_{ici})}$$

$$f = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

$$m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) = m_{cons} \cdot c_{pcons} \cdot (T_{cons} - T_{red})$$

$$T_t = \frac{(m_2 \cdot T_{ico} + m_{cons} \cdot T_{red})}{(m_2 + m_{cons})}$$

$$E_T = \frac{T_{cons} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

$$\text{Find}(T_{co}, T_{ci}, T_{ico}, T_{ici}, T_t, T_{cons}, A_c) \rightarrow \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right)$$

- **Cálculo de la instalación de ACS con pérdidas de calor.**

Dado

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = I_T \cdot N_{col} \cdot \eta_o \cdot A_c + Q_{col} \cdot N_{col}$$

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{co} - T_{ci}) + Q_{prim} = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) + Q_{sec}$$

$$E_{ic} = \frac{m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{c_{min} \cdot (T_{co} - T_{ici})}$$

$$f = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

$$m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{ico} - T_{ici}) + Q_{sec} = m_{cons} \cdot c_{pcons} \cdot (T_{cons} - T_{red}) + Q_{tanque}$$

$$T_t = \frac{(m_2 \cdot T_{ico} + m_{cons} \cdot T_{red})}{(m_2 + m_{cons})}$$

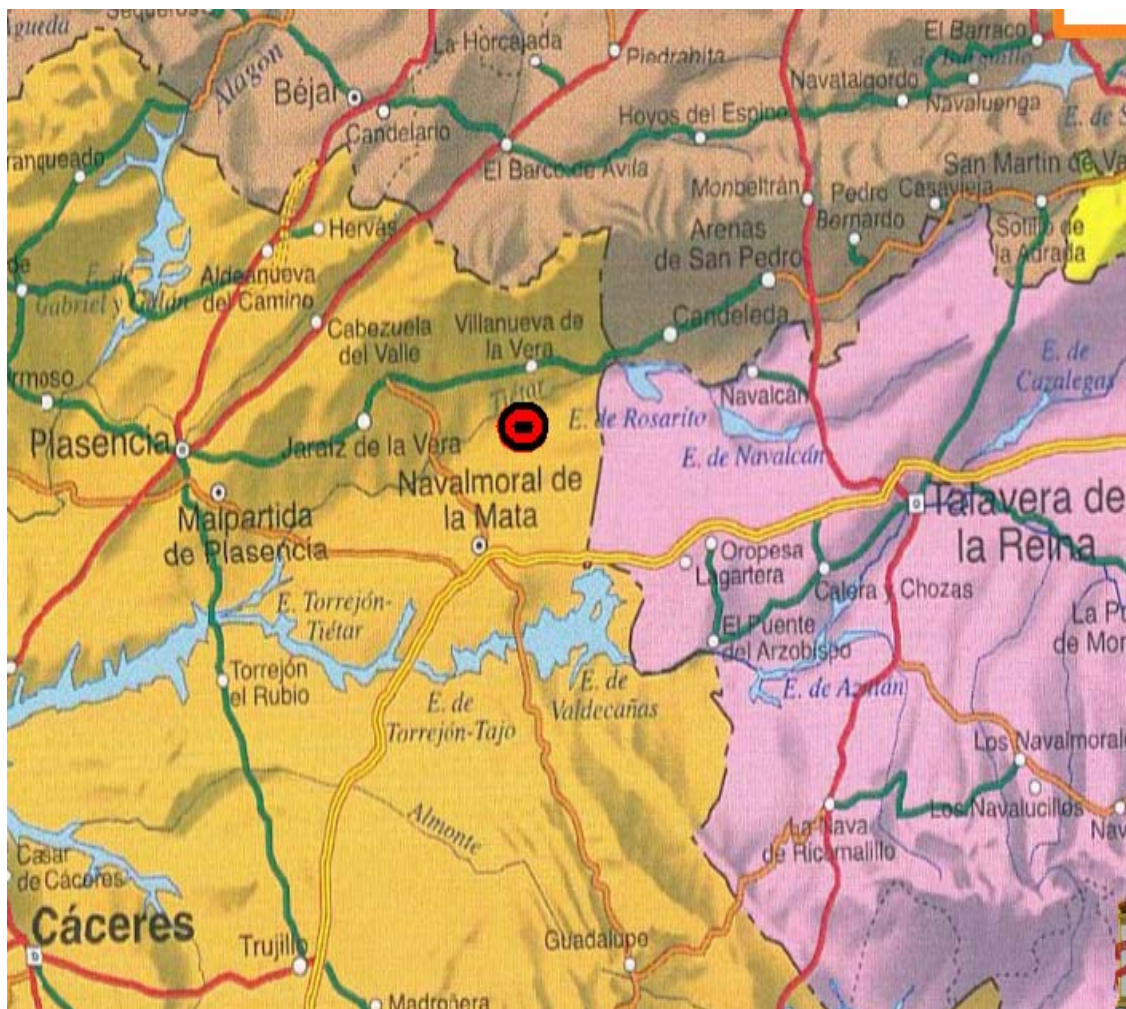
$$E_T = \frac{T_{cons} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

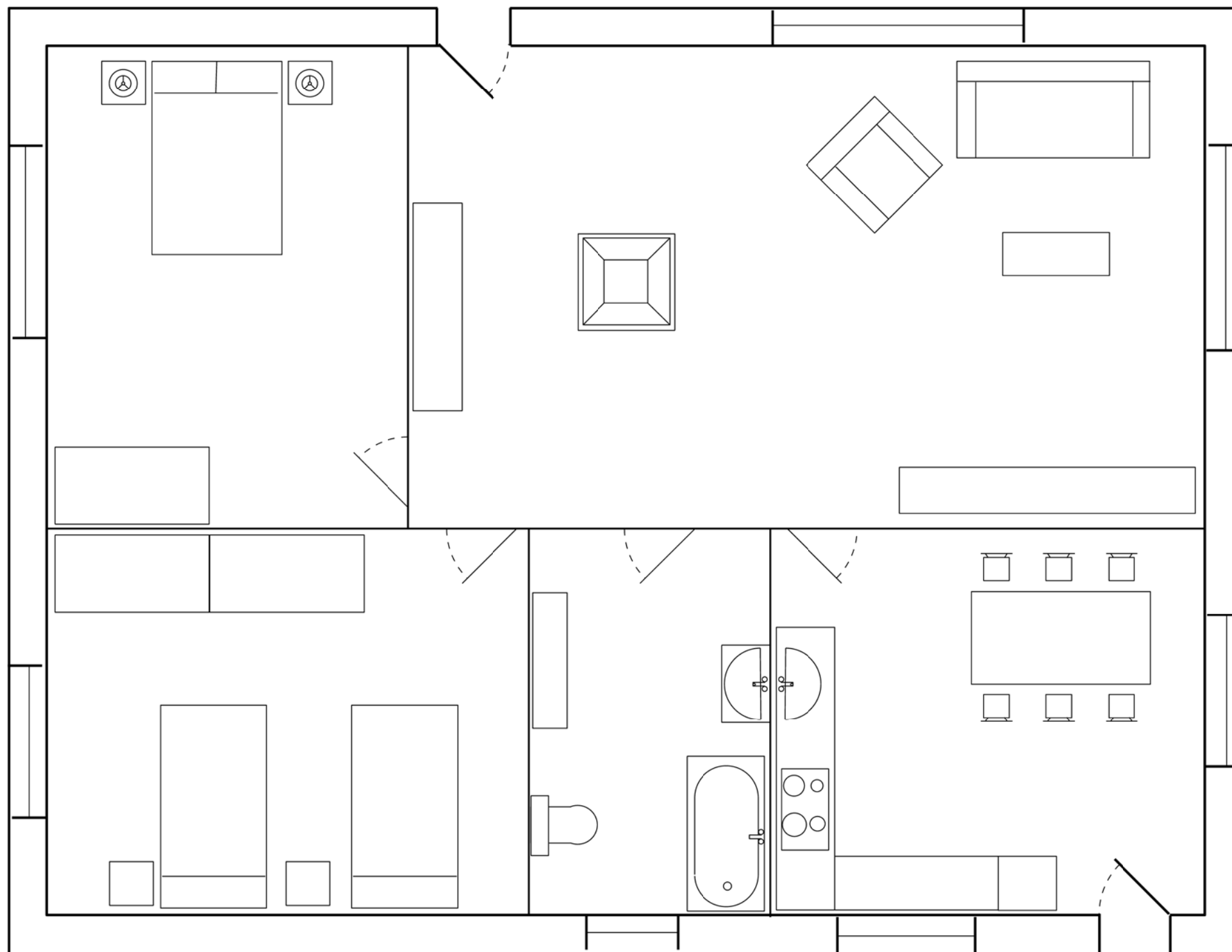
$$\text{Find}(T_{co}, T_{ci}, T_{ico}, T_{ici}, T_{cons}, T_t, f) \rightarrow \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right)$$

ANEXO III:

Planos

Plano de situación




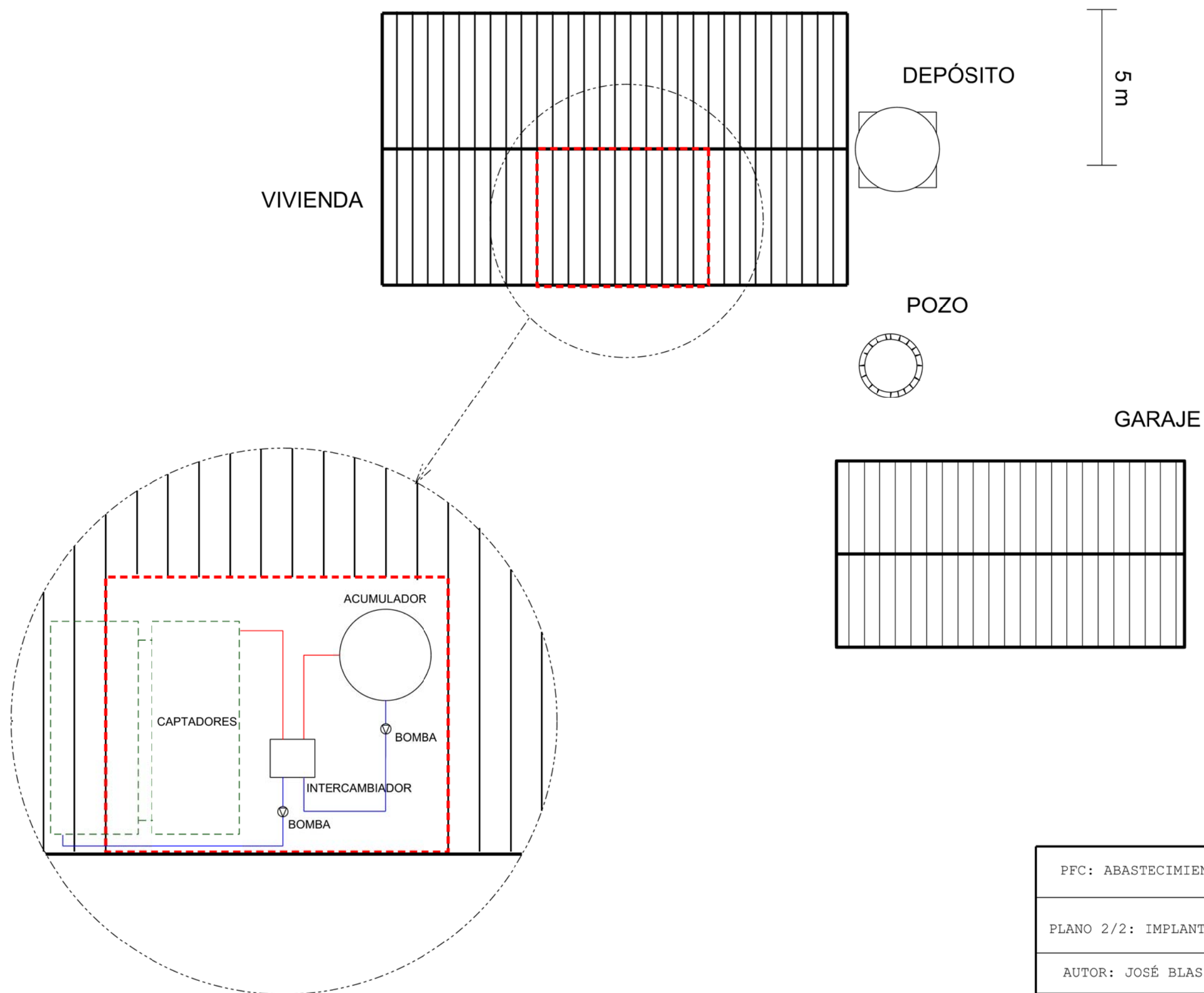


N



1 m

PFC: ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DE UNA FINCA RÚSTICA	
PLANO 1/2: DISTRIBUCIÓN PLANTA BAJA	
AUTOR: JOSÉ BLAS RICO GÓMEZ	
TUTOR: NÉSTOR GARCÍA HERNANDO	
FECHA: SEPTIEMBRE '10	



DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS EN BUHARDILLA

PFC: ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DE UNA FINCA RÚSTICA

PLANO 2/2: IMPLANTACIÓN DE EDIFICACIONES

AUTOR: JOSÉ BLAS RICO GÓMEZ

TUTOR: NÉSTOR GARCÍA HERNANDO

FECHA: SEPTIEMBRE '10



ANEXO IV:

Tablas de resultados.

Se recogen en este anexo las tablas resultantes del archivo de Microsoft Excel con el que se han realizado los cálculos de las pérdidas de calor en captadores, tubos y tanque acumulador, así como las resistencias térmicas utilizadas para calcular dichas pérdidas.

Las unidades empleadas en los archivos son las correspondientes al Sistema Internacional de unidades. La nomenclatura utilizada difiere de la habitual para facilitar la programación evitando símbolos, siendo de fácil interpretación en cualquier caso.

Demanda Energética para la instalación de ACS

MES	Temperatura agua de red [°K]	Q [MJ/día]	Q [MJ]	Horas de sol	Caudal [m3]	Factor corrección mensual (%)	Caudal Corregido [kg/s]
ENERO	281,2	31,44	974,74	8,00	0,16	11	0,006166667
FEBRERO	282,2	30,77	861,88	9,00	0,16	8	0,005333333
MARZO	283,2	30,11	933,27	9,00	0,16	2,7	0,005071605
ABRIL	284,2	29,44	883,09	9,50	0,16	9	0,005099415
MAYO	285,2	28,77	891,79	9,50	0,16	4	0,004865497
JUNIO	286,2	28,10	842,95	9,50	0,16	1	0,004725146
JULIO	287,2	27,43	850,31	9,50	0,16	-10	0,004210526
AGOSTO	286,7	27,76	860,68	9,50	0,16	-21	0,003695906
SEPTIEMBRE	285,2	28,77	863,02	9,00	0,16	-9	0,004493827
OCTUBRE	284,2	29,44	912,53	9,00	0,16	-7	0,004592593
NOVIEMBRE	282,7	30,44	913,20	8,00	0,16	2	0,005666667
DICIEMBRE	281,2	31,44	974,74	7,50	0,16	7,5	0,00637037
MEDIA	284,07	29,49	896,83	8,92	0,16	-	0,00502

TOTAL ANUAL	10762,00
--------------------	-----------------

Temperatura de consumo
328,15

Consumo diario de
0,16

Pérdidas en los captadores solares térmicos

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR EN SISTEMA ACS.

- Pérdidas de calor captadores.

Las unidades empleadas en las hojas de este archivo son:

Temperatura	K
Densidad	kg/m ³
Viscosidad dinámica	kg/m s
Longitud	m
Caudal	kg/s
Conductividad	W/m K
Coefficiente de convección	W/m ²
Resistencias térmicas	K/W
Pérdidas de calor	W
Velocidad	m/s

Además, se hace referencia a los siguientes números adimensionales:

<i>Reynolds</i>	<i>Nusselt</i>	<i>Prandtl</i>	<i>Rayleigh</i>
-----------------	----------------	----------------	-----------------

Cálculo de la Resistencia térmica por convección en la cara superior del captador

Resistencia térmica de convección para la parte superior de la caja										
MES	Vviento	Visco dinamica	Densidad aire	Reynolds	k	difusividad termica	Prandtl	Nusselt	Hconv	Rt
ENE	2	1,76816	1,2564	1,68E+05	2,42E-02	1,92E+00	7,34E-01	2,25E+02	5,07E+00	9,76E-02
FEB	2	1,77288	1,2522	1,67E+05	2,43E-02	1,93E+00	7,34E-01	2,24E+02	5,06E+00	9,77E-02
MAR	2,5	1,7916	1,2354	2,22E+05	2,46E-02	1,98E+00	7,33E-01	2,69E+02	6,17E+00	8,03E-02
ABR	2	1,8012	1,227	2,20E+05	2,48E-02	2,01E+00	7,32E-01	2,67E+02	6,16E+00	8,04E-02
MAY	3	1,82008	1,207	1,57E+05	2,51E-02	2,06E+00	7,31E-01	2,15E+02	5,01E+00	9,89E-02
JUN	2	1,84368	1,184	1,52E+05	2,54E-02	2,13E+00	7,30E-01	2,10E+02	4,98E+00	9,95E-02
JUL	2	1,85784	1,1786	1,50E+05	2,57E-02	2,17E+00	7,29E-01	2,08E+02	4,97E+00	9,96E-02
AGO	2	1,83896	1,1934	1,53E+05	2,54E-02	2,12E+00	7,30E-01	2,12E+02	5,00E+00	9,91E-02
SEP	2,5	1,83896	1,1934	2,09E+05	2,54E-02	2,12E+00	7,30E-01	2,59E+02	6,10E+00	8,11E-02
OCT	2,5	1,81064	1,2186	2,17E+05	2,49E-02	2,04E+00	7,32E-01	2,65E+02	6,14E+00	8,06E-02
NOV	2,5	1,78704	1,2396	1,64E+05	2,45E-02	1,97E+00	7,32E-01	2,21E+02	5,05E+00	9,80E-02
DIC	3	1,76816	1,2564	2,29E+05	2,42E-02	1,92E+00	7,34E-01	2,75E+02	6,20E+00	7,99E-02
MEDIA	2,34	0,147346667	1,22	1,84E+05	2,49E-02	2,03E+00	7,32E-01	2,38E+02	5,49E+00	9,11E-02

Lc	Aapertura
1,075	2,02

Cálculo de la Resistencia térmica por convección en la cara inferior del captador

Resistencia térmica de convección para la parte inferior de la caja										
MES	Vviento	Visco dinamica	Densidad aire	Reynolds	k	difusividad termica	Prandtl	Nusselt	Hconv	Rt
ENE	2	1,76816	1,2564	1,80E+05	2,42E-02	1,92E+00	7,34E-01	8,51E+02	1,92E+01	2,58E-02
FEB	2	1,77288	1,2522	1,67E+05	2,43E-02	1,93E+00	7,34E-01	8,27E+02	1,87E+01	2,65E-02
MAR	2,5	1,7916	1,2354	2,32E+05	2,46E-02	1,98E+00	7,33E-01	9,39E+02	2,15E+01	2,30E-02
ABR	2	1,8012	1,227	1,86E+05	2,48E-02	2,01E+00	7,32E-01	8,62E+02	1,98E+01	2,49E-02
MAY	3	1,82008	1,207	1,51E+05	2,51E-02	2,06E+00	7,31E-01	7,95E+02	1,85E+01	2,67E-02
JUN	2	1,84368	1,184	1,59E+05	2,54E-02	2,13E+00	7,30E-01	8,11E+02	1,92E+01	2,58E-02
JUL	2	1,85784	1,1766	1,53E+05	2,57E-02	2,17E+00	7,29E-01	7,97E+02	1,90E+01	2,60E-02
AGO	2	1,83896	1,1934	1,56E+05	2,54E-02	2,12E+00	7,30E-01	8,04E+02	1,90E+01	2,61E-02
SEP	2,5	1,83896	1,1934	1,50E+05	2,54E-02	2,12E+00	7,30E-01	7,93E+02	1,87E+01	2,65E-02
OCT	2,5	1,81064	1,2186	1,84E+05	2,49E-02	2,04E+00	7,32E-01	8,57E+02	1,99E+01	2,49E-02
NOV	2,5	1,78704	1,2396	1,58E+05	2,45E-02	1,97E+00	7,32E-01	8,09E+02	1,85E+01	2,68E-02
DIC	3	1,76816	1,2564	1,64E+05	2,42E-02	1,92E+00	7,34E-01	8,22E+02	1,85E+01	2,67E-02
MEDIA	2,34	0,147346667	1,22	1,70E+05	2,49E-02	2,03E+00	7,32E-01	8,31E+02	1,92E+01	2,58E-02

Lc	Apertura
1,075	2,02

Cálculo de la Resistencia térmica por convección del fluido circulante por los captadores

Convección en el fluido que circula por los colectores												
MES	Tfluido	visco dinam	Cp	densidad	caudal masico	Vfluido	Re	k	Pr	Nusselt	h	Rt
ENE	298,83	0,0036	3,762	1042,40267	0,014	8,72E-02	1,77E+02	0,348	3,64E+02	1,53E+01	2,17E+02	1,05E-02
FEB	305,68	0,0028	3,762	1038,06133	0,014	8,76E-02	2,27E+02	0,35	4,70E+02	2,07E+01	2,18E+02	1,04E-02
MAR	315,765	0,00195	3,8	1031,67717	0,014	8,82E-02	3,26E+02	0,3529	6,88E+02	3,22E+01	2,20E+02	1,03E-02
ABR	321,035	0,0017	3,816	1028,3395	0,014	8,84E-02	3,74E+02	0,3576	8,03E+02	3,82E+01	2,23E+02	1,02E-02
MAY	322,905	0,00168	3,8247	1027,15517	0,014	8,85E-02	3,79E+02	0,3588	8,17E+02	3,89E+01	2,23E+02	1,02E-02
JUN	329,995	0,0014	3,83724	1022,66483	0,014	8,89E-02	4,55E+02	0,3599	9,86E+02	4,85E+01	2,24E+02	1,01E-02
JUL	343,545	0,00095	3,87904	1014,08317	0,014	8,97E-02	6,70E+02	0,3611	1,47E+03	7,76E+01	2,25E+02	1,01E-02
AGO	347,405	0,0009	3,8874	1011,6385	0,014	8,99E-02	7,07E+02	0,3622	1,56E+03	8,30E+01	2,26E+02	1,01E-02
SEP	335,09	0,00136	3,8456	1019,438	0,014	8,92E-02	4,68E+02	0,3587	1,01E+03	5,02E+01	2,23E+02	1,02E-02
OCT	321,245	0,00165	3,82052	1028,2065	0,014	8,85E-02	3,86E+02	0,3529	8,17E+02	3,94E+01	2,20E+02	1,03E-02
NOV	307,4	0,0025	3,77872	1036,975	0,014	8,77E-02	2,55E+02	0,35	5,29E+02	2,38E+01	2,18E+02	1,04E-02
DIC	299,36	0,0034	3,762	1042,067	0,014	8,73E-02	1,87E+02	0,348	3,85E+02	1,64E+01	2,17E+02	1,05E-02

Tubos	
Diam ext	0,008
Diam int	0,007
Area	0,000153938

Lc	Aapertura	Ltubos
1,075	2,02	2

Cálculo de la Resistencia térmica por convección en la cámara de aire

Resistencia térmica de conveccion en la camara aire										
MES	Tplaca	Tcristal	Taire	beta	alfa	visco cinem	Ra	Nusselt	k	Rt
ENE	299,83	290,6183	295,22415	0,0033887	2,10E-05	1,54E-05	6,07E+01	1,0009	2,54E-02	6,35E+00
FEB	306,68	291,6603	299,17015	0,00334829	2,16E-05	1,57E-05	9,30E+01	1,0009	2,56E-02	6,42E+00
MAR	316,765	294,7863	305,77565	0,00328059	2,25E-05	1,64E-05	1,23E+02	1,0008	2,61E-02	6,53E+00
ABR	322,035	297,9123	309,97365	0,00323756	2,31E-05	1,68E-05	1,27E+02	1,0008	2,64E-02	6,61E+00
MAY	323,905	302,0803	312,99265	0,00320661	2,35E-05	1,70E-05	1,10E+02	1,0008	2,66E-02	6,66E+00
JUN	330,995	307,2903	319,14265	0,00314358	2,44E-05	1,76E-05	1,09E+02	1,0008	2,71E-01	6,77E+01
JUL	344,545	310,4163	327,48065	0,00305811	2,55E-05	1,84E-05	1,39E+02	1,0008	2,77E-02	6,92E+00
AGO	348,405	306,2483	327,32665	0,00305969	2,55E-05	1,84E-05	1,73E+02	1,0008	2,77E-02	6,92E+00
SEP	336,09	306,2483	321,16915	0,0031228	2,46E-05	1,78E-05	1,33E+02	1,0008	2,72E-02	6,81E+00
OCT	322,245	299,9963	311,12065	0,0032258	2,32E-05	1,69E-05	1,15E+02	1,0008	2,65E-02	6,63E+00
NOV	308,4	294,7863	301,59315	0,00332346	2,19E-05	1,60E-05	8,12E+01	1,0009	2,58E-02	6,46E+00
DIC	300,36	290,6183	295,48915	0,00338602	2,11E-05	1,54E-05	6,39E+01	1,0009	2,54E-02	6,35E+00

g	Lc
9,81	0,004

Resistencias térmicas de radiación en la cubierta y la placa-absorbedor.

RADIACION PLACA					
MES	To	Tabs	Tcieo	Tcristal	R
ENE	8	299,83	266,919856	290,6183	1,472844649
FEB	9	306,68	268,184774	291,6303	1,414783305
MAR	12	316,765	271,989572	294,7363	1,324186015
ABR	15	322,035	275,809374	297,9123	1,270828354
MAY	19	323,905	280,925648	302,0303	1,234776283
JUN	24	330,995	287,358029	307,2303	1,164568808
JUL	27	344,545	291,237078	310,4163	1,076424897
AGO	23	348,405	286,068276	306,2483	1,076408161
SEP	23	336,09	286,068276	306,2483	1,141774832
OCT	17	322,245	278,364206	299,9363	1,257120433
NOV	12	308,4	271,989572	294,7363	1,381124053
DIC	8	300,36	266,919856	290,6183	1,468843985
RADIACION CRISTAL					
MES	To	Tabs	Tcieo	Tcristal	R
ENE	8	299,83	266,919856	290,6183	0,919278155
FEB	9	306,68	268,184774	291,6303	0,908004763
MAR	12	316,765	271,989572	294,7363	0,875222699
ABR	15	322,035	275,809374	297,9123	0,843930697
MAY	19	323,905	280,925648	302,0303	0,804385576
JUN	24	330,995	287,358029	307,2303	0,758204531
JUL	27	344,545	291,237078	310,4163	0,732106882
AGO	23	348,405	286,068276	306,2483	0,767165727
SEP	23	336,09	286,068276	306,2483	0,767165727
OCT	17	322,245	278,364206	299,9363	0,823856645
NOV	12	308,4	271,989572	294,7363	0,875222699
DIC	8	300,36	266,919856	290,6183	0,919278155

Tabs tomada como diferencia entre entrada y salida de captador mas 1°C

Stephan-Boltzman	Eplaca	Ecristal
5,67E-08	0,1	0,1

A apertura
2,02

Pérdidas de calor en captadores. Resumen.

MES	Qsup	Qinf	Qfluido	Qtotal (W)
ENE	133,59	259,35	44,45	437,40
FEB	140,30	267,47	44,57	452,34
MAR	169,95	252,39	44,74	467,09
ABR	172,92	256,83	45,02	474,77
MAY	149,18	285,36	45,09	479,62
JUN	154,93	292,90	45,15	492,98
JUL	160,71	308,60	45,22	514,53
AGO	166,99	315,05	45,20	527,31
SEP	179,61	270,29	45,08	494,98
OCT	171,60	256,11	44,74	472,45
NOV	139,60	268,29	44,57	452,46
DIC	155,71	232,26	44,45	432,42

Qcristal	Qconv	QradE
10,8377403	96,9754315	25,7794051
17,1439007	97,2993615	25,853968
23,847573	120,053125	26,0467746
25,3497322	121,378597	26,1904518
22,4225565	100,457309	26,2991437
26,7287153	101,910338	26,2887782
31,4016613	103,108096	26,1972982
30,7053041	101,095140	26,3046479
28,8026847	124,499837	26,3046479
23,1826766	122,155218	26,2571099
15,2573845	98,291711	26,0467746
11,4379891	118,488718	25,7794051

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR EN TUBERÍAS Y TANQUE ACUMULADOR DE ACS.

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR EN SISTEMA ACS.

- Pérdidas de calor en el circuito primario
- Pérdidas de calor en el circuito secundario
- Pérdidas de calor en el tanque de ACS.

Las unidades empleadas en las hojas de este archivo son:

Temperatura	K
Densidad	kg/m ³
Viscosidad dinámica	kg/m s
Longitud	m
Caudal	kg/s
Conductividad	W/m K
Coefficiente de convección	W/m ²
Resistencias térmicas	K/W
Pérdidas de calor	W
Velocidad	m/s

Además, se hace referencia a los siguientes números adimensionales:

<i>Reynolds</i>	<i>Nusselt</i>	<i>Prandtl</i>	<i>Rayleigh</i>
-----------------	----------------	----------------	-----------------

Cálculo de la Resistencia térmica de convección

en la superficie de los tubos de los circuitos primario y secundario.

Primario												
MES	Ttubo	To	Toint	beta	alfa	visco cinem	Pr	RA	Nusselt	K	h	Rt
ENE	304,1705	281,15	282,11	0,00341134	2,0982E-05	1,5162E-05	7,31E-01	5,53E+05	9,11E+00	2,51E-02	2,25E+01	7,61E-02
FEB	303,908	282,15	283,23	0,00340635	2,1058E-05	1,5201E-05	7,31E-01	5,14E+05	8,91E+00	2,52E-02	2,19E+01	7,80E-02
MAR	303,901	286,15	287,71	0,0033806	2,1458E-05	1,5408E-05	7,30E-01	3,87E+05	8,16E+00	2,53E-02	2,00E+01	8,57E-02
ABR	303,9955	288,15	289,95	0,00336731	2,1666E-05	1,5516E-05	7,30E-01	3,29E+05	7,76E+00	2,54E-02	1,89E+01	9,05E-02
MAY	304,09	292,15	294,43	0,00334158	2,2075E-05	1,5728E-05	7,29E-01	2,17E+05	6,83E+00	2,56E-02	1,66E+01	1,03E-01
JUN	304,2125	297,15	300,03	0,00330993	2,2586E-05	1,5992E-05	7,28E-01	8,96E+04	5,24E+00	2,58E-02	1,26E+01	1,36E-01
JUL	304,391	300,15	303,39	0,00329066	2,2902E-05	1,6156E-05	7,28E-01	2,08E+04	3,45E+00	2,59E-02	8,25E+00	2,07E-01
AGO	304,048	296,15	298,91	0,00331698	2,2471E-05	1,5933E-05	7,29E-01	1,11E+05	5,58E+00	2,58E-02	1,34E+01	1,27E-01
SEP	303,9675	296,15	298,91	0,00331742	2,2464E-05	1,5929E-05	7,29E-01	1,10E+05	5,56E+00	2,58E-02	1,34E+01	1,28E-01
OCT	303,8275	290,15	292,19	0,00335561	2,1851E-05	1,5612E-05	7,30E-01	2,68E+05	7,28E+00	2,55E-02	1,77E+01	9,67E-02
NOV	304,013	285,15	286,59	0,00338637	2,1368E-05	1,5362E-05	7,30E-01	4,20E+05	8,37E+00	2,53E-02	2,05E+01	8,35E-02
DIC	304,2335	281,15	282,11	0,00341097	2,0987E-05	1,5165E-05	7,31E-01	5,54E+05	9,12E+00	2,51E-02	2,25E+01	7,61E-02

Secundario												
MES	Ttubo	To	Toint	beta	alfa	visco cinem	Pr	RA	Nusselt	K	h	Rt
ENE	299,239	281,15	282,11	0,00344027	2,0455E-05	1,49E-05	7,32E-01	4,52E+05	8,56E+00	2,49E-02	2,13E+01	6,02E-02
FEB	299,6415	282,15	283,23	0,00343129	2,0581E-05	1,50E-05	7,32E-01	4,28E+05	8,41E+00	2,50E-02	2,09E+01	6,14E-02
MAR	299,89	286,15	287,71	0,00340368	2,096E-05	1,51E-05	7,31E-01	3,05E+05	7,58E+00	2,51E-02	1,87E+01	6,86E-02
ABR	300,002	288,15	289,95	0,00339011	2,1149E-05	1,52E-05	7,31E-01	2,47E+05	7,11E+00	2,52E-02	1,75E+01	7,34E-02
MAY	300,359	292,15	294,43	0,00336254	2,1538E-05	1,54E-05	7,30E-01	1,40E+05	5,98E+00	2,54E-02	1,46E+01	8,77E-02
JUN	300,8705	297,15	300,03	0,00332945	2,2012E-05	1,57E-05	7,29E-01	1,44E+04	3,12E+00	2,56E-02	7,58E+00	1,89E-01
JUL	301,3845	300,15	300	0,00332566	2,2344E-05	1,59E-05	7,29E-01	3,04E+04	3,83E+00	2,57E-02	9,25E+00	1,39E-01
AGO	301,346	296,15	298,91	0,00333191	2,1984E-05	1,57E-05	7,29E-01	5,51E+04	4,54E+00	2,55E-02	1,10E+01	1,16E-01
SEP	300,5235	296,15	298,91	0,00333648	2,191E-05	1,56E-05	7,29E-01	3,67E+04	4,05E+00	2,55E-02	9,83E+00	1,31E-01
OCT	300,2365	290,15	292,19	0,00337595	2,1348E-05	1,53E-05	7,30E-01	1,94E+05	6,60E+00	2,53E-02	1,62E+01	7,93E-02
NOV	299,4805	285,15	286,59	0,00341256	2,0834E-05	1,51E-05	7,31E-01	3,27E+05	7,75E+00	2,51E-02	1,92E+01	6,70E-02
DIC	299,1375	281,15	282,11	0,00344088	2,0446E-05	1,49E-05	7,32E-01	4,50E+05	8,55E+00	2,49E-02	2,13E+01	6,03E-02

Resistencias térmicas de conducción en tubos y acumulador.

	Rtubos	Raisltubos
primario	1,8932E-05	6,07989775
secundario	1,4199E-05	4,55992331

material	k	espesor
cobre	401	1
aislante	0,034	0,25
acero	14,9	0,005

Rtanque	Raisltanque
0,00017729	0,43612099

Dint	Dext
0,0104	0,012

LtubosPrim	3
LtubosPrim	4

Caudal	0,03
--------	------

Htanque	Dtanque
1,205	0,505
1,265	0,565

sin aislar
aislado

Resistencia térmica de convección en los fluidos circulantes.

PROPILENGLICOL											
MES	To	Tfluido	Densidad	Viscosidad dinámica	Velocidad	k	Reynolds	Prandtl	Nusselt	h	Rtconv
ENE	2,81E+02	2,99E+02	1,04E+03	3,60E-03	3,47E-01	3,48E-01	1,04E+03	3,64E+02	6,32E+01	2,12E+03	4,82E-03
FEB	2,82E+02	3,06E+02	1,04E+03	2,80E-03	3,48E-01	3,50E-01	1,34E+03	4,70E+02	8,57E+01	2,88E+03	3,54E-03
MAR	2,86E+02	3,16E+02	1,03E+03	1,95E-03	3,50E-01	3,53E-01	1,93E+03	6,88E+02	1,33E+02	4,52E+03	2,26E-03
ABR	2,88E+02	3,21E+02	1,03E+03	1,70E-03	3,51E-01	3,58E-01	2,21E+03	8,03E+02	1,58E+02	5,44E+03	1,88E-03
MAY	2,92E+02	3,23E+02	1,03E+03	1,68E-03	3,52E-01	3,59E-01	2,24E+03	8,17E+02	1,61E+02	5,55E+03	1,84E-03
JUN	2,97E+02	3,30E+02	1,02E+03	1,40E-03	3,53E-01	3,60E-01	2,68E+03	9,86E+02	2,01E+02	6,94E+03	1,47E-03
JUL	3,00E+02	3,44E+02	1,01E+03	9,50E-04	3,50E-01	3,61E-01	3,96E+03	1,47E+03	3,21E+02	1,12E+04	9,14E-04
AGO	2,96E+02	3,47E+02	1,01E+03	9,00E-04	3,57E-01	3,62E-01	4,18E+03	1,56E+03	3,44E+02	1,20E+04	8,52E-04
SEP	2,96E+02	3,35E+02	1,02E+03	1,36E-03	3,55E-01	3,59E-01	2,76E+03	1,01E+03	2,08E+02	7,16E+03	1,42E-03
OCT	2,90E+02	3,21E+02	1,03E+03	1,65E-03	3,51E-01	3,53E-01	2,28E+03	8,17E+02	1,63E+02	5,54E+03	1,84E-03
NOV	2,85E+02	3,07E+02	1,04E+03	2,50E-03	3,49E-01	3,50E-01	1,50E+03	5,29E+02	9,84E+01	3,31E+03	3,08E-03
DIC	2,81E+02	2,99E+02	1,04E+03	3,40E-03	3,47E-01	3,48E-01	1,11E+03	3,85E+02	6,77E+01	2,27E+03	4,50E-03

AGUA											
MES	To	Tfluido	Densidad	Viscosidad dinámica	Velocidad	k	Reynolds	Prandtl	Nusselt	h	Rtconv
ENE	2,81E+02	2,95E+02	9,97E+02	9,74E-04	3,62E-01	6,01E-01	3,86E+03	4,62E+00	3,14E+01	1,81E+03	4,22E-03
FEB	2,82E+02	3,02E+02	9,95E+02	8,96E-04	3,63E-01	6,09E-01	4,19E+03	4,57E+00	3,34E+01	1,96E+03	3,91E-03
MAR	2,86E+02	3,10E+02	9,91E+02	7,86E-04	3,65E-01	6,21E-01	4,78E+03	4,54E+00	3,70E+01	2,21E+03	3,46E-03
ABR	2,88E+02	3,14E+02	9,90E+02	7,33E-04	3,65E-01	6,27E-01	5,13E+03	4,52E+00	3,91E+01	2,35E+03	3,25E-03
MAY	2,92E+02	3,16E+02	9,89E+02	7,08E-04	3,65E-01	6,30E-01	5,31E+03	4,47E+00	4,00E+01	2,42E+03	3,16E-03
JUN	2,97E+02	3,23E+02	9,86E+02	6,28E-04	3,66E-01	6,38E-01	5,99E+03	4,43E+00	4,39E+01	2,69E+03	2,84E-03
JUL	3,00E+02	3,35E+02	9,82E+02	4,69E-04	3,60E-01	6,55E-01	6,01E+03	4,34E+00	5,49E+01	3,40E+03	2,21E-03
AGO	2,96E+02	3,40E+02	9,80E+02	4,14E-04	3,69E-01	6,61E-01	9,08E+03	4,34E+00	6,07E+01	3,86E+03	1,98E-03
SEP	2,96E+02	3,28E+02	9,84E+02	5,62E-04	3,67E-01	6,45E-01	6,69E+03	4,45E+00	4,80E+01	2,98E+03	2,57E-03
OCT	2,90E+02	3,15E+02	9,89E+02	7,20E-04	3,65E-01	6,28E-01	5,22E+03	4,49E+00	3,95E+01	2,39E+03	3,20E-03
NOV	2,85E+02	3,03E+02	9,94E+02	8,81E-04	3,63E-01	6,11E-01	4,26E+03	4,59E+00	3,39E+01	1,99E+03	3,84E-03
DIC	2,81E+02	2,96E+02	9,97E+02	9,70E-04	3,62E-01	6,01E-01	3,88E+03	4,63E+00	3,15E+01	1,82E+03	4,19E-03

Cálculo de la resistencia térmica de conducción en la pared del acumulador

Tanque													
MES	Ttanque	To	Toint	Ttanqueext	beta	alfa	visco cinem	Pr	Ra	Nusselt	K	h	Rt
ENE	293,57	281,15	282,11	292,11	3,48E-03	2,00E-05	1,80E-05	7,33E-01	1,72E+08	5,96E+01	2,47E-02	3,05E+03	1,46E-04
FEB	299,12	282,15	283,23	293,23	3,41E-03	2,01E-05	1,80E-05	7,32E-01	1,66E+08	5,90E+01	2,48E-02	3,01E+03	1,48E-04
MAR	306,97	286,15	287,71	297,71	3,36E-03	2,07E-05	1,82E-05	7,31E-01	1,57E+08	5,79E+01	2,51E-02	2,92E+03	1,53E-04
ABR	310,7	288,15	289,95	299,95	3,33E-03	2,10E-05	1,83E-05	7,30E-01	1,53E+08	5,74E+01	2,53E-02	2,87E+03	1,55E-04
MAY	312,71	292,15	294,43	304,43	3,28E-03	2,16E-05	1,85E-05	7,29E-01	1,45E+08	5,63E+01	2,56E-02	2,78E+03	1,60E-04
JUN	318,52	297,15	300,03	310,03	3,23E-03	2,24E-05	1,88E-05	7,28E-01	1,36E+08	5,51E+01	2,60E-02	2,68E+03	1,66E-04
JUL	330,3	300,15	303,39	313,39	3,19E-03	2,28E-05	1,90E-05	7,27E-01	1,31E+08	5,44E+01	2,63E-02	2,62E+03	1,70E-04
AGO	334,59	296,15	298,91	308,91	3,24E-03	2,22E-05	1,88E-05	7,28E-01	1,38E+08	5,54E+01	2,59E-02	2,70E+03	1,65E-04
SEP	323,25	296,15	298,91	308,91	3,24E-03	2,22E-05	1,88E-05	7,28E-01	1,38E+08	5,54E+01	2,59E-02	2,70E+03	1,65E-04
OCT	311,89	290,15	292,19	302,19	3,31E-03	2,13E-05	1,84E-05	7,30E-01	1,49E+08	5,69E+01	2,54E-02	2,83E+03	1,58E-04
NOV	300,06	285,15	286,59	296,59	3,37E-03	2,06E-05	1,82E-05	7,31E-01	1,60E+08	5,82E+01	2,50E-02	2,94E+03	1,51E-04
DIC	293,82	281,15	282,11	292,11	3,42E-03	2,00E-05	1,80E-05	7,33E-01	1,69E+08	5,93E+01	2,47E-02	3,04E+03	1,47E-04

Suponemos la temperatura del tanque 10° mayor que la del ambiente

Diametro Ext	0,565
g	9,81

Ltanque	1,265
---------	-------

Pérdidas de calor en tuberías y tanque acumulador. Resumen.

Pérdidas en los conductos del circuito primario			
MES	Tfluído	To	Qperd
ENE	298,83	282,11	2,71
FEB	305,68	283,23	3,64
MAR	315,77	287,71	4,55
ABR	321,04	289,95	5,04
MAY	322,91	294,43	4,60
JUN	330,00	300,03	4,82
JUL	343,55	303,39	6,39
AGO	347,41	298,91	7,81
SEP	335,09	298,91	5,83
OCT	321,25	292,19	4,70
NOV	307,40	286,59	3,37
DIC	299,36	282,11	2,80

Pérdidas en el tanque			
MES	Ttanque	To	Qperd
ENE	293,57	282,11	26,26
FEB	299,12	283,23	36,41
MAR	306,97	287,71	44,13
ABR	310,70	289,95	47,54
MAY	312,71	294,43	41,88
JUN	318,52	300,03	42,36
JUL	330,30	303,39	61,65
AGO	334,59	298,91	81,75
SEP	323,25	298,91	55,77
OCT	311,89	292,19	45,14
NOV	300,06	286,59	30,86
DIC	293,82	282,11	26,83

Pérdidas en los conductos del circuito secundario			
MES	Tfluído	To	Qperd
ENE	295,40	282,11	2,87
FEB	301,52	283,23	3,95
MAR	310,25	287,71	4,87
ABR	314,42	289,95	5,28
MAY	316,42	294,43	4,73
JUN	322,75	300,03	4,80
JUL	335,30	303,39	6,79
AGO	339,65	298,91	8,71
SEP	327,95	298,91	6,19
OCT	315,48	292,19	5,02
NOV	302,69	286,59	3,48
DIC	295,72	282,11	2,94

TOTAL PERDIDAS	
MES	Qperd
ENE	31,84
FEB	44,01
MAR	53,54
ABR	57,86
MAY	51,21
JUN	51,98
JUL	74,83
AGO	98,27
SEP	67,78
OCT	54,86
NOV	37,71
DIC	32,57